

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A SELEÇÃO DE SINAIS SÍSMICOS DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO 8

ANA CECÍLIA CARNEIRO MONT'ALVERNE PARENTE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

Coorientador: Doutor Luís Augusto Ferreira Rodrigues de Macedo

JULHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e irmão

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José Miguel Castro, na qualidade de orientador científico, pelo apoio, interesse e disponibilidade demonstrados ao longo do semestre, pela motivação que me foi transmitida, por todo o conhecimento que me foi proporcionado e pela confiança em mim depositada para a realização de um estágio na empresa SimpleAxis durante a realização deste trabalho.

Ao Doutor Luís Macedo, na qualidade de coorientador científico, por sempre ter se mostrado disponível para esclarecer dúvidas relativas a este trabalho, pela confiança que depositou em mim durante a realização do estágio na SimpleAxis e pela partilha do algoritmo de otimização para possibilitar o funcionamento adequado da ferramenta desenvolvida.

A toda a equipa da empresa SimpleAxis pela contribuição diária que resultou no desenvolvimento deste trabalho, por toda a atenção, paciência e cuidado que tiveram ao me elucidar sobre vários temas de natureza informática, em especial ao Tiago Pais e ao Ricardo Alves, pelas horas despendidas em explicações, sem as quais tornar-se-ia mais custosa a conceptualização deste trabalho.

Aos amigos que fiz nesta Faculdade pelo apoio sempre prestado e pelos bons momentos que passamos juntos, seja em condições de trabalho no decorrer do curso ou em ocasiões de lazer.

Ao Miguel por sempre acreditar em mim, pela motivação que sempre me deu e por ter me encorajado e impulsionado a mudar de país e vir estudar nesta instituição, da qual hoje me orgulho em fazer parte.

Aos meus pais e ao meu irmão por sempre me apoiarem incondicionalmente, pelos valores morais e éticos nos quais sempre procuraram alicerçar a minha formação pessoal e por me oferecerem todas as condições necessárias para a conclusão deste curso. A eles a minha mais profunda gratidão e admiração.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta informática que permitisse a seleção e escalamento de sinais sísmicos para uma análise dinâmica de acordo com o Eurocódigo 8. Esta norma permite tanto a análise sísmica com base num espectro de respostas, como também representações alternativas da ação sísmica com base numa análise no domínio do tempo, na qual o campo de acelerações à superfície do terreno induzido pela ocorrência sísmica é imposto ao meio estrutural em análise. Visando possibilitar a análise no domínio do tempo por meio de uma escolha rigorosa de sinais sísmicos, de modo adequado e compatível com o espectro regulamentar, foi desenvolvida uma ferramenta informática designada por SelEQ. Trata-se de uma *framework* que apresenta procedimentos complexos para seleção e escalamento de registos de sinais sísmicos e que incorpora várias metodologias, as quais facilitam uma seleção preliminar de registos sísmicos e permitem critérios de seleção avançada.

A utilização desta ferramenta tem como objetivo apoiar engenheiros projetistas de estruturas no que diz respeito à análise dinâmica de estruturas. Pretendeu-se desenvolver uma ferramenta de acesso livre e de fácil utilização. O acesso à aplicação foi concebido utilizando um *frontend*, responsável pela interface com o utilizador, o qual realiza um pedido ao *backend*, onde se localiza todo o código desenvolvido para a realização do processo de seleção e de cálculo, escrito na linguagem de programação Python. Finalizada essa operação, o *backend* processa o pedido e apresenta os resultados ao utilizador através do módulo de *frontend*. Foi, também, tido o cuidado de estruturar a ferramenta de forma modular para permitir que o desenvolvimento desta possa ser continuado e aperfeiçoado no futuro.

Por fim, procederam-se a análises estruturais dinâmicas, apoiando-se no *software* AutoDesk Robot Structural Analysis, a partir dos resultados advindos da ferramenta acerca da seleção dos sinais sísmicos para uma análise dinâmica no domínio do tempo. Foi feito um estudo comparativo entre esta análise e a análise com base num espectro de respostas.

PALAVRAS-CHAVE: Seleção de Sinais Sísmicos, Análise Dinâmica, Espectro de Resposta, Compatibilidade Espectral, Eurocódigo 8

ABSTRACT

This thesis aimed at the development of a computational tool capable for the selection and scaling of seismic ground motions records in order to perform dynamic analysis according to Eurocode 8. This regulation allows not only the dynamic analysis based on elastic response spectrum, but also alternative representations of the seismic action based on a time domain analysis, whereas the ground surface seismic time histories is imposed as excitation of the structural system. Aiming to enable the time domain analysis by means of an accurate ground motion record selection, with a suitable approach and compatible with the code spectra, a tool called SelEQ was developed. It is a framework that incorporates several procedures available in the literature in order to facilitate a preliminary record selection and allowing advanced selection criteria.

The tool developed in this work can be useful for structural engineers dealing with structural dynamic analysis. The tool was also intended to be free and easily accessible. The access to the application is made through the frontend, responsible for the user interface, which performs a request to the backend, where all the code responsible for the selection and calculation, written in Python language, is located. When this task is finished, the backend processes the request and returns the results to the user through the frontend. It was also considered the need to organize a modular structure to allow the extension and improvement of the tool in the future.

Finally, structural dynamic analyses were operated, using the software AutoDesk Robot Structural Analysis, from the data that the application returns to the user regarding to the ground motion records selection in order to carry out a time domain dynamic analysis. A comparative study is made between this analysis and the analysis based on elastic response spectrum.

KEYWORDS: Ground-Motion Selection, Dynamic Analysis, Response Spectra, Spectral Compatibility, Eurocode 8

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. SELEÇÃO DE SINAIS SÍSMICOS PARA ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS.....	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 CONTEXTO DA SELEÇÃO DE REGISTOS SÍSMICOS.....	5
2.2.1 TIPOS DE REGISTOS SÍSMICOS	6
2.2.1.1 Artificiais	6
2.2.1.2 Simulados	7
2.2.1.3 Reais	7
2.2.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE SINAIS	7
2.2.2.1 Avaliação baseada na intensidade.....	7
2.2.2.2 Avaliação baseada no cenário	7
2.2.2.3 Avaliação baseada no tempo	7
2.3 SELEÇÃO DE SINAIS SÍSMICOS BASEADA EM CÓDIGO	8
2.3.1 GENERALIDADES.....	8
2.3.2 LIMITAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM CÓDIGO.....	8
2.3.3 CÓDIGOS REGULAMENTARES DE PROJETO E DE AVALIAÇÃO SÍSMICA	9
2.3.3.1 Norma Europeia	9
2.3.3.2 Norma Americana.....	9
2.3.3.3 Norma Neozelandesa.....	10
2.3.4 BREVE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SELEÇÃO.....	11
2.3.4.1 Seleção Preliminar	11
2.3.4.2 Espectro alvo	11
2.3.4.3 Critérios de agrupamento	14

2.4	BASES DE DADOS DE REGISTOS SÍSMICOS	14
2.4.1	FERRAMENTAS EXISTENTES	15
2.5	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	15

3. DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA A SELEÇÃO DE REGISTOS SÍSMICOS 17

3.1	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS.....	17
3.2	MODELO DE BASE DE DADOS	17
3.2.1	INTRODUÇÃO	17
3.2.2	BASE DE DADOS PEER NGA.....	18
3.2.3	MODELO DE ENTIDADE-RELAÇÃO.....	18
3.2.3.1	Entidades	19
3.2.3.2	Atributos.....	20
3.2.3.3	Relações	23
3.2.3.4	Diagrama de Entidade-Relação	24
3.2.4	MODELO RELACIONAL	25
3.2.4.1	Normalização do Modelo Relacional de Base de Dados	27
3.2.4.2	Diagrama do Modelo Relacional	27
3.3	SISTEMA DE GESTÃO DE BASE DE DADOS.....	28
3.4	FRAMEWORK PARA SELEÇÃO E ESCALAMENTO DE REGISTOS SÍSMICOS.....	28
3.4.1	ARQUITETURA DO SELEQ.....	29
3.4.2	DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS CONSTITUINTES DO SELEQ	30
3.4.2.1	Resultados	32

4. DOCUMENTAÇÃO DA FERRAMENTA DE SELEÇÃO 35

4.1	INTRODUÇÃO.....	35
4.2	CLASSE DATABASE.....	35
4.3	CLASSE POPULATE	36
4.4	CLASSE SPECTRUM.....	37
4.4.1	MÉTODO EC8_SPECTRA	38
4.5	CLASSE NGADATABASEWRAPPER.....	38
4.5.1	MÉTODO SET_FILTERS	39
4.5.2	MÉTODO GET_RECORDS	39
4.6	CLASSE SELECTION	39

4.6.1	PROCESSAMENTO DE DADOS PARA SELEÇÃO.....	40
4.6.1.1	Método __init__	40
4.6.1.2	Método _set_filters	40
4.6.1.3	Método set_target_spectrum.....	40
4.6.1.4	Método get_pre_selection	40
4.6.2	EXECUÇÃO DO CÓDIGO DE SELEÇÃO E ESCALAMENTO DE SINAIS SÍSMICOS	40
4.6.2.1	Método run_selection	40
4.6.3	RESULTADOS.....	41
4.6.3.1	Método get_results_summary	41
4.6.3.2	Método get_results_detailed	41
4.6.3.3	Método plot_spectra	42
4.6.3.4	Método get_time_series	43

5. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA A UM CASO DE ESTUDO 45

5.1	INTRODUÇÃO	45
5.2	DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	45
5.3	ANÁLISE MODAL.....	47
5.4	ANÁLISE DA HISTÓRIA NO TEMPO	49
5.4.1	RESULTADOS.....	52
5.5	ANÁLISE MODAL POR ESPECTRO DE RESPOSTA	53
5.6	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE ANÁLISES	55
5.6.1	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DOS PISOS.....	55
5.6.2	DESLOCAMENTOS RELATIVOS ENTRE PISOS.....	56
5.6.3	ESFORÇOS NOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	57
5.6.4	REAÇÕES NOS APOIOS	58

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 61

6.1	SUMÁRIO E CONCLUSÕES	61
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Exemplo de acelerogramas artificiais com a comparação da média dos três espectros com o espectro alvo do código de projetos sísmicos francês [4].....	6
Fig. 2.2 - Exemplo de compatibilidade entre a média do conjunto de espectros e o espectro alvo do código [8]..	10
Fig. 2.3 - Forma do espectro de resposta elástico [1]	12
Fig. 3.1 – PEER NGA <i>flat-file</i>	19
Fig. 3.2 - Esquema gráfico do MER, representando entidades, atributos e relações	19
Fig. 3.3 – Rake Angle	20
Fig. 3.4 - Representação esquemática de hipocentro e de epicentro	21
Fig. 3.5 - Representação gráfica das distâncias sísmicas, atributos da entidade Acelerograma.....	22
Fig. 3.6 - Diagrama de Entidade-Relação para a ferramenta desenvolvida.....	24
Fig. 3.7 - Mapeamento do MER para o Modelo Relacional	25
Fig. 3.8 - Esquema simplificado de atributos e chaves primária e estrangeira	26
Fig. 3.9 - Parte da tabela Acelerograma	26
Fig. 3.10 - Diagrama do Modelo Relacional.....	27
Fig. 3.11 – Interface gráfica do <i>software DBEaver</i> para gestão da base de dados.....	28
Fig. 3.12 – Arquitetura da framework SelEQ	29
Fig. 3.13 – Interface gráfica do módulo de seleção preliminar.....	30
Fig. 3.14 - Interface gráfica do módulo do espectro alvo	31
Fig. 3.15 – Interface gráfica do módulo de critério de agrupamento	31
Fig. 3.16 – Interface gráfica do módulo de requerimentos do utilizador para a análise	32
Fig. 3.17 – Interface gráfica dos resultados	33
Fig. 4.1 – Exemplo de imagem gerada pelo método <i>plot_spectra</i>	43
Fig. 4.2 – Ficheiro de Excel gerado para o utilizador	44
Fig. 5.1 - Representação em corte e em planta do edifício, dimensões dos elementos estruturais	46
Fig. 5.2 – Espectro do EC8 que caracteriza a zona geográfica do edifício em estudo	46
Fig. 5.3 – Distribuição das ações gravíticas num piso do pórtico.....	47
Fig. 5.4 – Output da ferramenta SelEQ, apresentando o gráfico dos espectros escalados.....	49
Fig. 5.5 – Análise do histórico no tempo pelo software Robot	50
Fig. 5.6 – Acelerações unitárias impostas nos apoios	51
Fig. 5.7 – Amortecimento de Rayleigh.....	51
Fig. 5.8 – Deslocamentos de um ponto do solo para o sinal 1	52
Fig. 5.9 - Deslocamentos de um ponto do solo para o sinal 2	52
Fig. 5.10 – Deslocamentos de um ponto do solo (verde) e um ponto na cobertura (azul) para o sinal 2	53
Fig. 5.11 – Deslocamentos de um ponto em cada piso para o sinal 3.....	53
Fig. 5.12 – Identificação de nós	54
Fig. 5.13 – Gráfico da evolução dos deslocamentos entre pisos calculados pela média dos sinais e pelo espectro de resposta	56
Fig. 5.14 – Gráfico da distribuição ao longo da altura do deslocamento relativo entre pisos para ambas as análises.....	57
Fig. 5.15 – Identificação das barras analisadas.....	57
Fig. 5.16 – Identificação dos nós relativos aos apoios.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Parâmetros S , T_B , T_C e T_D dos espectros de resposta elásticos em Portugal	13
Quadro 2.2 - Valores de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno tipo A, nas zonas sísmicas de Portugal	13
Quadro 2.3 – Valores dos coeficientes de importância (γ_I)	13
Quadro 3.1 – Valores do mecanismo de rotura	21
Quadro 5.1 – Características dos elementos estruturais do edifício em estudo	46
Quadro 5.2 – Ações gravíticas atuantes sobre o pórtico	47
Quadro 5.3 – Frequência e período dos modos de vibração	48
Quadro 5.4 – Output da ferramenta SelEQ, apresentando a amostra temporal e o fator de escala de cada sinal	49
Quadro 5.5 – Respostas em termos de deslocamentos	55
Quadro 5.6 - Valores dos deslocamentos horizontais dos pisos [m] para ambas as análises consideradas, em %	55
Quadro 5.7 - Valores dos deslocamentos relativos entre pisos [m] para ambas as análises consideradas, em %	56
Quadro 5.8 – Valores dos esforços para ambas as análises consideradas.....	58
Quadro 5.9 – Valores das reações nos apoios para ambas as análises consideradas	59

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

D_1 – parâmetro da norma neozelandesa

G – ação permanente

Q – ação variável

S – coeficiente do solo

S_e – aceleração espectral

T_B – limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante

T_C – limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante

T_D – limite que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante

T_1 – período fundamental da estrutura

Letras Gregas

α_g – valor de cálculo da aceleração para um terreno tipo A

α_{gR} – valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno tipo A

γ_1 – coeficiente de importância

η – fator de correção do amortecimento

θ – coeficiente de sensibilidade de deslocamento relativo entre pisos

Abreviaturas

API – interface de aplicação de programação

ASCE – American Society of Civil Engineers

CMS – espectro médio condicional

CSV – comma-separated values

CQC – combinação quadrática completa

DCM – nível de ductilidade médio

DER – diagrama de entidade-relação

EC8 – Eurocódigo 8

ER – entidade-relação

ESD – European Strong-Motion Database

FK – chave externa

GUI – interface gráfica do utilizador

HTTP – protocolo de transferência de hipertexto

ITACA – Italian Accelerometric Archive

LDA – análise dinâmica linear

MER – modelo de entidade-relação

MRSA – análise modal por espectro de resposta

NZS – New Zealand Standard

OO – orientação a objetos

ORM – mapeamento objeto-relacional

Pandas – Python Data Analysis Library

PEER – Pacific Earthquake Engineering Research Center

PGA – aceleração de pico do terreno

PGD – deslocamento de pico do terreno

PGV – velocidade de pico do terreno

PK – chave primária

PSHA – análise probabilística de perigosidade sísmica

RESORCE – Reference Database for Seismic Ground Motion Prediction in Europe

SF – fator de escala

SQL – linguagem de consulta estruturada

SRSS – raiz quadrada da soma dos quadrados

THA – análise *time-history*

UHS – espectro de perigosidade uniforme

1NF – primeira forma normal

2NF – segunda forma normal

3NF – terceira forma normal

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Diante das mudanças tecnológicas que estão a dominar o mundo com soluções práticas e inteligentes, o aperfeiçoamento do padrão de qualidade dos projetos passou a ser um imperativo para se poder evidenciar no mercado de trabalho atualmente. Na Engenharia Civil, que é uma área com um elevado nível de responsabilidade social, é de fundamental importância que as tomadas de decisão estejam o mais sustentadas possível num sólido e desenvolvido conhecimento, sempre de acordo com os regulamentos e normas vigentes. Aliando o avanço da tecnologia com o facto de boa parte dos profissionais desta área dedicar-se às atividades de projeto, surge progressivamente a necessidade de tornar as decisões mais versáteis, ágeis e flexíveis, com maior liberdade de experimentação. Deste modo, a utilização de ferramentas informáticas tem-se tornado indispensável na atividade profissional de Engenharia, sem com isso descurar a exigência de um conhecimento técnico e crítico do utilizador para, além de fazer uso da ferramenta, avaliar as soluções que lhe são propostas.

Atualmente, em Portugal, o projeto sísmico de estruturas encontra-se num estágio evoluído de implementação do Eurocódigo 8 [1], norma mais abrangente e detalhada em paridade com o regulamento vigente em território português, o Regulamento de Segurança e Ações [2]. Tal norma permite, além da análise dinâmica com base num espectro de respostas, representações alternativas da ação sísmica com base numa análise no domínio do tempo, as quais serão objeto de estudo deste trabalho.

Com o constante avanço da tecnologia e, por conseguinte, do número de *softwares* disponíveis para a análise avançada de estruturas, definiu-se a análise dinâmica não linear como procedimento mais fiável e preferencial para avaliar o desempenho de estruturas, o que tem levado a um número considerável de investigações no sentido de definir a precisão das técnicas de seleção de registos sísmicos, tendo em vista que uma seleção mais precisa, além de abreviar a desigualdade na resposta estrutural obtida, favorece a fiabilidade dos resultados fornecidos pela análise estrutural. No entanto a maioria das ferramentas disponíveis fazem uma seleção apenas baseada na compatibilidade entre a média aritmética do conjunto de espectros gerados a partir dos sinais sísmicos e o espectro alvo, o qual pode ser obtido a partir de códigos de projeto sísmico.

Neste trabalho, descreve-se a conceção, desenvolvimento, implementação e posterior aplicação exemplificativa de uma ferramenta informática chamada SelEQ. Trata-se de uma *framework*, disponibilizada em *web*, que apresenta procedimentos complexos para seleção e escalamento de registos de sinais sísmicos e que incorpora várias metodologias, as quais facilitam uma seleção preliminar de registos sísmicos e permitem critérios de seleção avançada. A ferramenta foi concebida visando

disponibilidade *open-source* e desenvolvida em linguagem Python num paradigma orientado a objetos. Inicialmente, o programa processa um conjunto de dados de entrada, que vão servir de parâmetros para uma pré-seleção numa base de dados pré-existente, ligada a um servidor. Em seguida, foi implementado um algoritmo de otimização meta-heurístico, designado por Adaptive Harmony Search, de modo a minimizar significativamente o custo computacional e, consequentemente, o tempo de análise durante o processo de pesquisa de resultados de acordo com os critérios de seleção impostos. Seguidamente os resultados são retornados para o utilizador em forma de gráficos e ficheiros de texto e de Excel. O trabalho é finalizado com um exemplo de aplicação da ferramenta desenvolvida a um edifício metálico dimensionado de acordo com o Eurocódigo 3.

1.2 OBJETIVOS

A realização deste trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma aplicação informática para a realização de seleção de sinais sísmicos de acordo com os critérios regulamentares estabelecidos no Eurocódigo 8. Como ponto de partida para a conceção de uma ferramenta deste género, houve a cooperação da empresa SimpleAxis, com o propósito de apresentar os desafios inerentes ao desenvolvimento da aplicação e discutir a melhor estrutura para a ferramenta de modo que esta seja bastante otimizada para os seus utilizadores.

A ferramenta foi estruturada de forma modular, permitindo que o desenvolvimento desta possa ser continuado e aperfeiçoado no futuro por meio da adição de novos módulos que permitam que as suas funcionalidades sejam expandidas tanto a outros tipos de estruturas, como a novas bases de dados de registos de sinais sísmicos.

Pretendeu-se desenvolver uma ferramenta livre e facilmente acessível. O acesso à aplicação foi pensado utilizando um *frontend*, responsável pela interface com o utilizador, o qual realiza um pedido ao *backend*, onde se localiza todo o código desenvolvido para a realização do processo de seleção e de cálculo. Finalizada essa operação, o *backend* processa o pedido e apresenta os resultados ao utilizador através do módulo de *frontend*.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído por seis capítulos e está estruturado de forma a permitir ao leitor todo o processo de desenvolvimento da ferramenta de seleção, sendo apresentadas explanações detalhadas acerca da conceção, implementação e do funcionamento da mesma.

O presente capítulo corresponde ao primeiro da dissertação, **Introdução**, onde é feita uma descrição sumária do enquadramento da dissertação, dos objetivos a que a autora se propôs e da estrutura do presente documento;

No segundo capítulo, **Seleção de sinais sísmicos para análise dinâmica de estruturas**, são descritos os tipos de registos sísmicos e os métodos utilizados para a seleção dos sinais, fazendo uma analogia com aquilo que foi empregue na implementação da ferramenta desenvolvida e apresentando o contexto regulamentar no qual a mesma se fundamenta;

No terceiro capítulo, **Desenvolvimento de uma ferramenta para seleção de registos sísmicos**, é apresentado o modelo de base de dados no qual a ferramenta assenta todas as informações necessárias para a pesquisa de informações relativas aos registos sísmicos, assim como são descritos os módulos inerentes à *framework* da ferramenta.

No quarto capítulo, **Documentação da ferramenta de seleção**, é explicada a estrutura do programa em detalhe, utilizando alguns excertos de código escritos em Python como exemplo para a integração do leitor com a estrutura da ferramenta, visando uma melhor compreensão do seu funcionamento.

No quinto capítulo, **Aplicação da ferramenta a um caso de estudo**, é apresentado um pórtico metálico e sua subsequente modelação num software que permita realizar análises dinâmicas, como a análise do histórico de acelerações no domínio do tempo e a análise modal por espectro de resposta. São comparadas as respostas em termos de deslocamentos e esforços para ambas as análises.

No sexto capítulo, **Considerações finais**, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

2

SELEÇÃO DE SINAIS SÍSMICOS PARA ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o contexto da seleção de sinais sísmicos e são enunciados os tipos de registos e as diversas formas de estabelecer seleções criteriosas dos mesmos, visando uma resposta estrutural aceitável. São também expostos os principais códigos nos quais um engenheiro projetista deverá basear-se para seguir métodos padronizados de escolha e escalamento destes sinais sísmicos. São apresentados os critérios regulamentares usualmente utilizados para este fim, bem como descritos aqueles que foram implementados na conceção da ferramenta. Da mesma forma é exposta a base de dados de registos sísmicos na qual assentam as informações utilizadas pela aplicação.

2.2 CONTEXTO DA SELEÇÃO DE REGISTOS SÍSMICOS

Os registos sísmicos são selecionados e escalados com a finalidade de possibilitar uma análise dinâmica de acordo com a história da resposta estrutural no tempo, de forma a apoiar o projeto e a avaliação de desempenho de estruturas. Como é reconhecido, a análise elástica de estruturas sujeitas a ações sísmicas, normalmente efetuada sob a forma de espectro de resposta, não é considerada a mais adequada em determinadas situações, como por exemplo edifícios com alto grau de ductilidade, estruturas com configurações muito irregulares em planta ou em altura, estruturas críticas cujas falhas podem levar a danos inaceitáveis ou mesmo ao seu colapso. Diante destas situações, o engenheiro é levado a aplicar uma história de movimentos do solo no tempo, cujos requisitos são um modelo não linear apropriado para a estrutura e um conjunto adequado de acelerogramas que representam a excitação sísmica. Deste modo, foi definida a análise dinâmica não linear como procedimento preferencial para analisar a ação sísmica das estruturas, facto que tem levado a um número relevante de estudos a fim de estabelecer formas precisas de seleção e escalamento de registos sísmicos, tendo em vista que uma seleção mais precisa, além de diminuir a desigualdade perante a resposta estrutural obtida, favorece a credibilidade dos resultados fornecidos pela análise estrutural.

De acordo com Araújo et al. [3], a estimativa da resposta estrutural sísmica depende tanto do tipo de registo sísmico quanto dos métodos utilizados para seleção do conjunto adequado de sinais e seu escalamento.

2.2.1 TIPOS DE REGISTOS SÍSMICOS

Existem três tipos de registos sísmicos, isto é, três opções de como gerar séries de acelerações de um sismo no tempo, disponíveis para o engenheiro: artificiais, simulados e reais.

2.2.1.1 Artificiais

Na ausência de sinais reais e perante a necessidade de obter uma história temporal de acelerações para a análise dinâmica de estruturas, existem técnicas para a geração artificial dessa mesma. Nesses casos, utilizam-se acelerogramas artificiais compatíveis com o espectro de acelerações pretendido, como ilustrados na Fig. 2.1. Essa geração artificial é efetuada com o auxílio de algoritmos cuja abordagem consiste na geração de espectros de sinais e, em seguida, na origem de sinais sinusoidais com ângulos de fase e amplitudes aleatórios, que são somados entre si a partir de um procedimento iterativo para aprimorar a comparação destes espectros com o espectro alvo de resposta. A vantagem desta abordagem é a possibilidade de obter séries de acelerações que são quase totalmente compatíveis com o espectro elástico de cálculo. No entanto, quando se trata de análise não linear, o uso de registos artificiais fica comprometido, tendo em vista que estes possuem um teor de energia que é irrealista comparado a registos sísmicos reais.

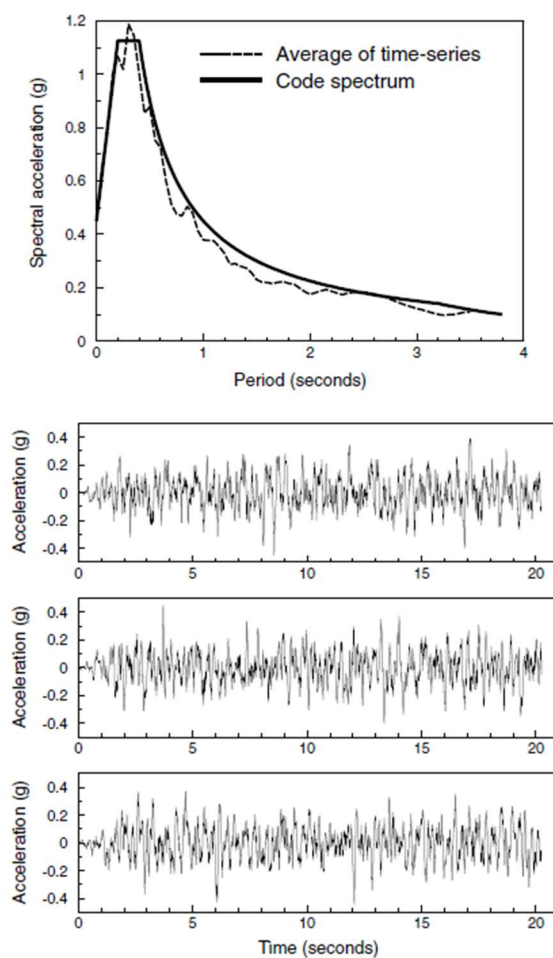


Fig. 2.1 - Exemplo de acelerogramas artificiais com a comparação da média dos três espectros com o espectro alvo do código de projetos sísmicos francês [4]

2.2.1.2 Simulados

Os acelerogramas simulados são derivados a partir de parâmetros sismológicos, uma vez que o movimento do solo em um determinado local é o efeito coletivo de três fatores: fonte do sismo, caminho de propagação e efeitos da localidade do edifício. Já foram desenvolvidos alguns programas para a geração simulada de histórias temporais de aceleração, mas a utilização destes requer conhecimentos avançados no ramo da engenharia sísmica por parte do engenheiro, no que diz respeito à especificação de parâmetros necessários para a caracterização da fonte do sismo, tendo em vista que a determinação destes parâmetros relativos a sismos anteriores acarreta um alto grau de incerteza.

2.2.1.3 Reais

Os acelerogramas reais registados durante abalos sísmicos são mais facilmente acessíveis nos dias de hoje, devido ao avanço da tecnologia e do incremento de informações às bases de dados existentes. O controlo destes acelerogramas é de relativa simplicidade, de modo que o engenheiro projetista é capaz de seleccionar um conjunto de registos sísmicos sem a necessidade de conhecimentos mais específicos e avançados em engenharia sísmica.

2.2.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE SINAIS

De acordo com Bachman et al. [5], o método a ser escolhido para seleccionar e escalar sinais sísmicos depende do tipo de abordagem a adotar na avaliação de desempenho sísmico de uma estrutura. Esta avaliação pode ser baseada em três fatores caracterizadores: na intensidade, no cenário ou no tempo.

2.2.2.1 Avaliação baseada na intensidade

Este é o tipo de avaliação mais comum dos três tipos supramencionados. Neste caso, a resposta estrutural é avaliada de acordo com uma intensidade específica do abalo sísmico. Métodos baseados em códigos são abrangidos por esta análise e fazem uso de um modelo matemático levando em consideração, no seu essencial, respostas sísmicas médias. Esta opção de avaliação analisa o desempenho sísmico por meio de um espectro de resposta de acelerações definido pelo utilizador.

2.2.2.2 Avaliação baseada no cenário

Neste tipo de avaliação, a análise sísmica de uma estrutura é efetuada considerando um determinado cenário que consiste num sismo de magnitude definida que ocorre em um local específico. Assim sendo, o desenvolvimento deste tipo de análise exige o conhecimento do valor da magnitude e da distância epicentral entre o abalo sísmico e o recetor. Esta avaliação é vantajosa no caso de edifícios que têm uma localização próxima a falhas ativas e pode ser utilizada caso se manifeste um historial de sismos ocorrentes devidamente caracterizados. A avaliação baseada no cenário difere da baseada na intensidade pelo facto de considerar a incerteza na intensidade do abalo sísmico.

2.2.2.3 Avaliação baseada no tempo

A avaliação baseada no tempo, muitas vezes designada de avaliação baseada no risco, fornece informação sobre a resposta sísmica durante um período de tempo especificado pelo utilizador (por exemplo, taxas anuais ou 1 ano, ou vida útil de um edifício, 50 a 100 anos), considerando todos os abalos

sísmicos que podem ocorrer neste período de tempo bem como a probabilidade de ocorrência associada a cada sismo. Esta análise considera a incerteza na magnitude, na localização de futuros sismos e na intensidade dos abalos provocados por estes sismos.

2.3 SELEÇÃO DE SINAIS SÍSMICOS BASEADA EM CÓDIGO

2.3.1 GENERALIDADES

Perante o exposto nos tópicos anteriores, a ferramenta computacional foi desenvolvida de modo a atender aos requisitos de métodos baseados em código, utilizando acelerogramas reais que estão previstos numa base de dados que será comentada *a posteriori*.

Normalmente é prescrito, como regra geral, o controlo das ordenadas da média espectral do conjunto de registos selecionados em relação ao espectro alvo do código. Para ser considerada a resposta média de um determinado parâmetro, é necessário que este grupo de registos consista em pelo menos sete registos. No caso de este conjunto ser composto por três registos, podendo variar até seis, então é considerada a máxima resposta obtida entre todos estes registos. Para uma análise dinâmica não linear a recomendação da generalidade dos códigos regulamentares de projetos sísmicos consiste no recurso a pelo menos três registos temporais sísmicos. Os registos podem ser obtidos por meio de eventos sísmicos reais, artificiais ou simulados, embora seja dada preferência para os reais, por serem mais facilmente acessíveis conforme o discutido na subsecção 2.2.1.3. Apesar de não se manifestar uma harmonia perfeita entre os diferentes códigos regulamentares no que concerne aos critérios de seleção e escalamento de sinais, existe uma base de entendimento comum aos diferentes regulamentos sobre os requisitos de que as séries de acelerações no tempo, sejam estas reais, artificiais ou simuladas, devem ser compatíveis com o espectro de projeto prescrito em cada código. As avaliações de seleção de registos baseada em códigos geralmente permitem a realização de uma seleção preliminar baseada em parâmetros sismológicos que são congruentes com o cenário de perigosidade sísmica, seguido de uma verificação de compatibilidade espectral com o espectro alvo.

2.3.2 LIMITAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM CÓDIGO

Atualmente, a generalidade dos códigos regulamentares de projeto e de avaliação sísmica estabelecem critérios para seleção e escalamento de registos sísmicos que visam uma estimativa realista da exigência sísmica média. No entanto existem variações da resposta sísmica dos edifícios causadas pela indefinição do número mínimo de registos sísmicos a considerar na análise, o qual varia de código para código. Essa incerteza é, regra geral, tendenciosa quando se utilizam métodos de seleção de registos baseados em código, devido à falta de um consenso sobre o procedimento mais adequado para selecionar e escalar os registos de sinais sísmicos de acordo com o código de projeto e de avaliação sísmica, que é pautada por diferentes abordagens vertidas nos códigos mais atuais. Como exemplo de algumas carências nas seleções baseadas em códigos, tem-se que um problema de particular relevância corresponde ao facto que os códigos atuais abordam a variabilidade da resposta sísmica de forma determinística, sem esclarecimento cabal acerca da comparação entre o máximo de três respostas sísmicas ou a média de sete ou mais respostas sísmicas. A esse fato acresce ainda não serem providenciadas disposições dentro dos contextos regulamentares a respeito de como a resposta sísmica média é afetada pelo número de registos sísmicos em um conjunto selecionado e pela incompatibilidade espectral entre os sinais sísmicos individuais e o espectro de resposta alvo prescrito no código. Devido a essas deficiências da seleção de sinais sísmicos, manifestadas no contexto de uma avaliação baseada em código, Bradley [6] apresentou uma abordagem baseada em probabilidade para estimar exigências sísmicas de projeto. Esta análise

tenciona apresentar uma resposta sísmica média que tenha uma probabilidade de estar entre 16% a 84% da resposta sísmica média real, independentemente do número de registos por grupo. Esta análise baseada em probabilidade leva em consideração as incertezas das ações sísmicas, o que pode acarretar uma escolha de sinais bastante diferente quando comparada com uma análise baseada em código, a qual apresenta valores espectrais mais conservativos.

2.3.3 CÓDIGOS REGULAMENTARES DE PROJETO E DE AVALIAÇÃO SÍSMICA

A maior parte dos métodos desenvolvidos até então para selecionar e escalar de maneira coerente os sinais sísmicos baseia-se na compatibilidade entre a média do conjunto de espectros derivados dos sinais sísmicos e um espectro alvo do código, o qual geralmente pode ser obtido por meio do código de projeto sísmico ou originado por meio de uma análise probabilística de perigosidade sísmica (PSHA). Os códigos de projeto e avaliação de desempenho sísmico estabelecem critérios quanto ao processo de seleção de registos de sinais, especificamente em termos do número de acelerogramas a considerar na análise bem como o grau de compatibilidade entre a média espectral derivada dos registos e o espectro alvo. Métodos de seleção e escalamento de sinais sísmicos foram propostos nas normas europeias, americanas e neozelandesas, as quais são apresentadas a seguir.

2.3.3.1 Norma Europeia

O Eurocódigo (EC8) [1] estabelece os seguintes critérios para seleção e escalamento de registos sísmicos: (i) a média dos valores da resposta espectral de aceleração com período nulo (calculada a partir dos registos no tempo) não deverá ser inferior ao valor de $a_g S$ para o local em questão, sendo a_g a aceleração do solo de projeto e S o parâmetro do solo; (ii) e, no domínio dos períodos compreendidos entre $0.2T_1$ e $2T_1$, sendo T_1 o período fundamental da estrutura na direção segundo a qual será efetuada a análise dinâmica, nenhum valor do espectro de resposta elástica médio com 5% de amortecimento, calculado a partir de todos os registos no tempo, deverá ser inferior a 90% do valor correspondente do espectro de resposta elástica com 5% de amortecimento. A Fig. 2.2 mostra um exemplo desta compatibilidade espectral pretendida.

2.3.3.2 Norma Americana

De acordo com a ASCE 41-13 [7], quando é realizada uma análise planar bidirecional, a raiz quadrada da soma dos quadrados das duas principais componentes horizontais dos registos deve ser escalada de tal forma que o valor da média do conjunto espectral de amortecimento de 5%, construído a partir dos registos no tempo, não seja menor do que as correspondentes ordenadas do espectro alvo de resposta para os períodos entre $0.2T_1$ e $1.5T_1$.

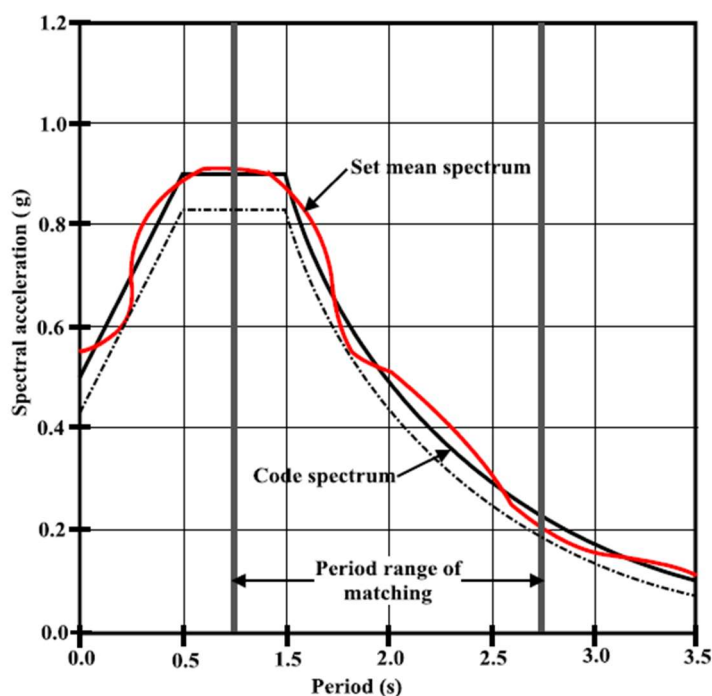


Fig. 2.2 - Exemplo de compatibilidade entre a média do conjunto de espectros e o espectro alvo do código [8]

A abordagem do escalamento de registos é apresentada na norma ASCE 7-10 [7], a qual estabelece que os registos devem ser escalados de modo que as respostas máximas no plano horizontal dos registos obtidos sejam, em média, iguais ou superiores ao espectro de cálculo dentro da gama de períodos pretendida. Esta norma, além de permitir análises tridimensionais, também define que o espectro alvo é igual ao espectro elástico, considerando que o espectro elástico é baseado na resposta horizontal máxima, em vez de considerar a média da resposta horizontal.

2.3.3.3 Norma Neozelandesa

De acordo com a norma NZS 1170.5:2004 [9], os registos de sinais sísmicos são escalados por dois fatores de escala aplicados no domínio do tempo: o fator de escala do registo k_1 e o fator de escala da família k_2 . Deste modo, as ordenadas dos registos devem ser multiplicadas pelo produto $k_1 k_2$.

O fator de escala do registo k_1 , cujo valor é recomendado no documento entre $0.33 < k_1 < 3.0$, é estipulado como um valor escalar que minimiza a função $\log(k_1 SA_c / SA_t)$, onde SA_c diz respeito ao espectro construído por cada componente de registo sísmico e SA_t ao espectro alvo do código para um dado local, dentro de uma gama de períodos de interesse, entre $0.4T_1$ e $1.3T_1$. Convém que o registo selecionado apresente uma adequada compatibilidade com o espectro alvo. Outra condição é assegurar que D_1 (Eq. (2.1)) seja menor do que $\log(1.5)$, onde:

$$D_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log(SA_c) - \log(SA_t))^2} \quad (2.1)$$

O fator de escala de família k_2 , cujo valor deve estar entre $1.0 < k_2 < 1.3$, é definido como o máximo valor do rácio $SA_t/\max(SA_c) > 1$ dentro de uma gama de períodos de interesse na direção em consideração, onde $\max(SA_c)$ é a componente de valor máximo de cada registo.

2.3.4 BREVE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SELEÇÃO

É feita nesta subsecção uma descrição geral dos procedimentos utilizados para a seleção de sinais sísmicos no desenvolvimento deste trabalho, a qual se inicia com uma seleção preliminar dos registos, e prossegue com a verificação de compatibilidade entre os espectros provenientes dos acelerogramas com o espectro alvo.

2.3.4.1 Seleção Preliminar

A maioria dos métodos de seleção de sinais baseados em código propõe a realização de uma seleção preliminar cautelosa, de modo a selecionar características sismológicas de forma consistente com o cenário de risco sísmico associado à estrutura em análise, considerando expectáveis magnitude, distâncias de epicentro do sismo ao edifício, perfil do terreno e mecanismo de rotura do terreno. Quando esta pré-seleção é efetuada, o número de registos sísmicos qualificados pode ser significativo, e o número de combinações entre os registos pode atingir valores excessivamente altos. O número total do conjunto de sinais que podem ser agrupados é dado pela seguinte equação:

$$N_{sol} = C_r^n = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (2.2)$$

onde n é o número total de registos sísmicos posteriormente à pré-seleção e r é o número de registos por conjunto. Por exemplo, no caso de existirem 100 registos após uma seleção preliminar, considerando um conjunto de 7 sinais sísmicos, existirão cerca de 1.6×10^{10} possíveis conjuntos.

2.3.4.2 Espectro alvo

A Parte 1 do Eurocódigo 8 (EC8-1) diferencia os tipos de ação sísmica entre tipo 1 e tipo 2. A ação do tipo 1 corresponde a um sismo a grande distância focal (distância entre o epicentro e a estrutura em causa), e a ação do tipo 2 corresponde a um sismo a reduzida distância focal. A caracterização desta ação sísmica depende maioritariamente de dois aspetos: tipo de terreno, dividido em 5 tipos: A, B, C, D ou E, e zona do território nacional. Para a escolha dos valores de aceleração a_{gR} considera-se como referência um abalo sísmico com um período de retorno de 475 anos.

A ação sísmica é representada na forma de espectro de resposta elástica, tal como ilustrado na Fig. 2.3, chamado de espectro alvo. As ordenadas deste espectro traduzem as múltiplas acelerações a que sistemas elásticos, de um grau de liberdade, estarão sujeitos durante um evento sísmico, com um dado período de retorno.

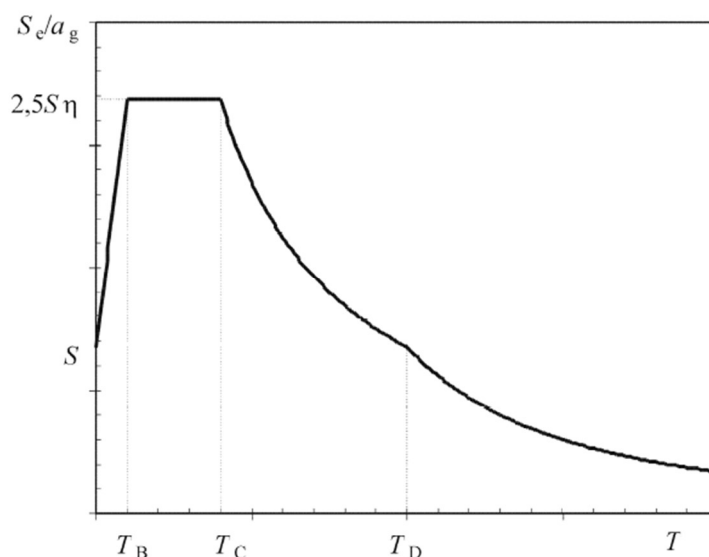


Fig. 2.3 - Forma do espectro de resposta elástico [1]

Para as componentes horizontais da ação sísmica, o espectro de resposta elástica é definido pelas seguintes equações definidas na Eq. (2.3):

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_B & \quad S_e(T) = a_g * S * \left[1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 2.5 - 1) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C & \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 \\
 T_C \leq T \leq T_D & \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 * \left[\frac{T_C}{T} \right] \\
 T_D \leq T \leq 4s & \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 * \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

em que: $S_e(T)$ é a aceleração espectral; a_g é o valor de cálculo da aceleração perçecionada no terreno tipo A (terreno de maior rigidez segundo a gradação proposta no Eurocódigo 8); T_B é o limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante; T_C é o limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante; T_D é o valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante; S é o coeficiente do solo; η é o fator de correção do amortecimento.

Os parâmetros S , T_B , T_C e T_D dependem do tipo de ação sísmica e do terreno onde a estrutura se encontra. Em Portugal, a definição dos espectros de resposta elástica é efetuada atendendo ao prescrito no Documento de Aplicação Nacional do EC8, sendo propostos os valores indicados no Quadro 2.1.

Relativamente ao valor de cálculo da aceleração sísmica horizontal à superfície de um terreno do tipo A, este pode ser obtido por meio da Eq. (2.4), em que a_{gR} representa o valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno tipo A e γ_I corresponde ao coeficiente de importância. Os valores de referência da aceleração máxima dependem do tipo de ação sísmica e do zonamento sísmico. No Quadro 2.2 são representados estes valores condizentes às zonas sísmicas de Portugal, as quais podem ser consultadas no Documento de Aplicação Nacional do EC8. Por sua vez, os valores do coeficiente de

importância, apresentados no Quadro 2.3, dependem da classe de importância da estrutura e do tipo de ação sísmica.

$$a_g = a_{gR} * \gamma_I \quad (2.4)$$

Quadro 2.1 - Parâmetros S , T_B , T_C e T_D dos espectros de resposta elásticos em Portugal

Ação Sísmica Tipo 1					Ação Sísmica Tipo 2				
Tipo de Terreno	S	T_B	T_C	T_D	Tipo de Terreno	S	T_B	T_C	T_D
A	1,0	0,1	0,6	2,0	A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0	B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0	C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0	D	2,0	0,1	0,30	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0	E	1,8	0,1	0,25	2,0

Quadro 2.2 - Valores de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno tipo A

Ação Sísmica Tipo 1		Ação Sísmica Tipo 2	
Zona Sísmica	a_{gR} (m/s ²)	Zona Sísmica	a_{gR} (m/s ²)
1.1	2,5	2.1	2,5
1.2	2,0	2.2	2,0
1.3	1,5	2.3	1,7
1.4	1,0	2.4	1,1
1.5	0,6	2.5	0,8
1.6	0,35	-	-

Quadro 2.3 – Valores dos coeficientes de importância (γ_I)

Classe de Importância	Ação Sísmica Tipo 1	Ação Sísmica Tipo 2	
		Portugal Continental	Açores
I	0,65	0,75	0,85
II	1,00	1,00	1,00
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,50	1,35

Regra geral, o espectro alvo definido nos códigos de projeto sísmico é um espectro de perigosidade uniforme (UHS), o qual pode ser originado tendo por base uma análise probabilística de risco sísmico (PSHA) para uma dada gama de períodos e uma dada probabilidade de ocorrência. Esta metodologia resulta numa envolvente de acelerações espectrais máximas que é improvável de ser observada a partir de um só registo sísmico. Com a finalidade de transpor essa limitação, Backer and Cornell [10] sugerem uma forma alternativa de avaliação do espectro alvo, designado de Espectro Médio Condicional (CMS), o qual corresponde ao espectro de resposta médio condicionado à ocorrência de uma dada aceleração espectral no período de interesse. Este método requer resultados da desagregação da perigosidade sísmica para o local e para o período de interesse, apresentando maior rigor visto que é mais dirigido para a estrutura e para o local de implantação da mesma, ao passo que o espectro alvo do código pode conduzir a um cenário excessivamente conservativo. Refira-se que, apesar da carência de ferramentas adequadas e disponíveis para a avaliação do Espectro Médio Condicional, esta metodologia revela-se promissora, tendo vindo a ganhar relevância e popularidade nos últimos anos. Neste trabalho não será abordado este recurso, podendo, no entanto, ser facilmente implementado na ferramenta agora proposta visando o seu aperfeiçoamento. Sem embargo, deverá ser aqui referido que é justamente essa uma das vantagens da ferramenta proposta e desenvolvida no presente trabalho: a sua capacidade adaptativa, permitindo a sua extensão a novas técnicas e criando assim uma base de trabalho para incorporações futuras.

2.3.4.3 Critérios de agrupamento

Finalizada a fase da seleção preliminar dos registos sísmicos de acordo com parâmetros sismológicos, torna-se necessário verificar a compatibilidade entre os espectros originados através desses registos com o espectro prescrito no código. A determinação do espectro de acelerações de um sinal sísmico consiste em submeter um sistema de um grau de liberdade ao acelerograma correspondente e proceder à avaliação máxima da aceleração experimentada por esta massa, a qual é determinada ao resolver a equação governativa do equilíbrio dinâmico da estrutura quando sujeita a uma excitação sísmica aplicada na sua base.

De acordo com o Eurocódigo 8, nenhum valor das acelerações espectrais médias do conjunto de sinais sísmicos deverá estar abaixo de 90% do valor do espectro alvo no domínio dos períodos compreendidos entre $0.2T_1$ e $2T_1$, onde T_1 é o período fundamental da estrutura na direção em que o acelerograma é aplicado. Além deste critério, estudos recentes [11] mostram as vantagens de acrescentar um critério adicional na seleção individual de sinais sísmicos no sentido de limitar em 50% a incompatibilidade de um espectro gerado por um sinal sísmico comparada ao espectro alvo. Este critério foi discutido tendo em conta a constatação de que, quando registos sísmicos possuem forma espectral similar à forma do espectro alvo adotado, tanto os números de registos sísmicos quanto a desigualdade nas respostas estruturais obtidas reduzem-se de forma sistemática. Esse facto favorece tanto o tempo de análise computacional necessário pela aplicação para realizar a mais coerente seleção, quanto à precisão e à fiabilidade da mesma.

2.4 BASES DE DADOS DE REGISTOS SÍSMICOS

As bases de dados de registos sísmicos consistem numa compilação de registos sísmicos de alta qualidade, fornecendo assim informação diversa preciosa sobre os eventos sísmicos. Tratando-se de bases de dados alargadas, os diferentes parâmetros sobre eventos sísmicos podem ser seleccionados de acordo com os critérios adotados atendendo à finalidade da análise. Dada a relevância da informação

que pode ser extraída de registos reais de eventos sísmicos, as bases de dados encontram-se em permanente atualização e expansão, existindo, à presente data, diversas bases de dados disponibilizadas para pesquisa, seleção e *download* de dados sísmicos. A título de exemplo referem-se as seguintes por serem as consideradas como mais relevantes, seja pela quantidade de eventos sísmicos registados e coligidos, seja pela qualidade da informação: i) European Strong-Motion Database (ESD); ii) Italian Accelerometric Archive (ITACA); iii) Reference Database for Seismic Ground Motion Prediction in Europe (RESORCE); iii) Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), sendo esta última dividida em duas: PEER NGA e PEER NGA-WEST2.

Apesar da existência de diferentes bases de dados, a utilização de uma base de dados comum pode, potencialmente, reduzir variações indesejadas de modelo para modelo, atribuídas às diferenças não intencionais na seleção de dados, as quais dificultam uma comparação rigorosa e sistemática entre modelos. A ferramenta proposta faz utilização de parâmetros que estão definidos na base de dados PEER NGA a qual apresenta, no seu catálogo de registos, atualmente, informação relativa a 3551 registos sísmicos. Alicerçado nas informações dispostas nesta base de dados, será criado um conjunto de dados estruturados num determinado modelo, o qual será descrito no capítulo 3.

2.4.1 FERRAMENTAS EXISTENTES

Outras ferramentas já foram desenvolvidas no âmbito da pesquisa de seleção de sinais sísmicos para viabilizar uma análise dinâmica no domínio do tempo. Como exemplo citam-se as ferramentas PEER NGA [12] e REXEL [13]. A primeira se trata de uma aplicação também disponibilizada em *web*, na qual ao utilizador é dada a opção de gerar o espectro alvo baseado na norma americana [7] ou gerar um espectro cujos pontos são definidos pelo próprio utilizador. A ferramenta REXEL foi desenvolvida visando a seleção de registos sísmicos reais baseada em código e permite a seleção de conjuntos com 7, 14 ou 21 sinais compatíveis com o espectro alvo prescrito no Eurocódigo 8, no código sísmico Italiano [14], ou com um espectro definido pelo utilizador. Esta ferramenta só pode ser executada no sistema MS Windows® e requer a instalação do software MATLAB.

2.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Um eficiente processo de seleção de registos faz, regra geral, uso de procedimentos iterativos complexos, e consequentemente morosos, que consistem na procura da melhor solução dentro de um conjunto de combinações possíveis de variáveis. Esta solução é encontrada maximizando ou minimizando uma função objetivo. Em geral, são aplicados algoritmos de otimização com a finalidade de definir, de forma eficiente, conjuntos de registos de tal modo que se cumpram os critérios prescritos. Esta metodologia recorre a algoritmos matemáticos que visam otimizar um problema específico dado um conjunto de restrições. Estes algoritmos podem ser de dois tipos: exatos, que asseguram a obtenção da melhor solução num tempo de análise provavelmente improcedente, ou aproximados, que encontram a melhor solução para um determinado intervalo de tempo de análise estabelecido pelo utilizador. Refira-se que este último tipo de algoritmo procura um balanço entre precisão, por um lado, e aplicabilidade, por outro.

A ferramenta desenvolvida no âmbito desta dissertação recorre a algoritmos meta-heurísticos, que são um tipo de algoritmos aproximados que buscam soluções ótimas para problemas complexos de otimização com um esforço computacional aceitável, ou seja, permitindo que o tempo de análise seja razoável, não a tornando proibitiva para aplicações práticas de engenharia. Estes algoritmos utilizam combinações de escolhas de registos aleatórios por meio de um método iterativo até encontrar a melhor

combinação de registos que minimize a discrepância entre a média da resposta espectral do grupo e do espectro alvo. A utilização do algoritmo *Harmony Search* foi proposta por Haydar Kayhan et al. [15] para a seleção e escalamento de registos de sinais sísmicos, tendo os autores concluído que tal metodologia viabiliza a obtenção de um conjunto de dados sísmicos eficiente e compatível com o espectro de cálculo do código. Posteriormente, Macedo [11] realizou um estudo paramétrico visando avaliar a influência de diferentes algoritmos de otimização em procedimentos de seleção de registos. Tal estudo permitiu concluir que o método designado por *Adaptive Harmony Search* proporciona as melhores funcionalidades para fins de seleção e escalamento de registos sísmicos. Desse modo, e atendendo aos recentes estudos apresentados na bibliografia, é justamente este algoritmo de otimização selecionado para implementação na ferramenta proposta na presente dissertação, tendo já sido implementado em estudos anteriores [8]. Salienta-se que, no código relacionado ao desenvolvimento da ferramenta, existe um envio de pedido para o algoritmo de otimização, pelo que o funcionamento deste algoritmo não é o âmbito deste trabalho.

3

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA A SELEÇÃO DE REGISTOS SÍSMICOS

3.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

No presente capítulo descreve-se o desenvolvimento e a implementação da ferramenta informática proposta, cujo objetivo principal é possibilitar a seleção de registos temporais de acelerações que possam vir a ser utilizados numa análise dinâmica de estruturas.

Numa fase inicial, procurou-se estruturar um modelo de base de dados, de modo a permitir a representação de um conjunto de dados selecionados e organizados que atendam aos objetivos da aplicação. Seguidamente, foi concebido o código de seleção, desenvolvido, essencialmente, na linguagem de programação Python, a qual abrange a construção de todo o algoritmo de controlo do programa para a realização de seleções. Todo o código de seleção é executado no *backend*. Numa fase posterior, houve ainda a necessidade de desenvolvimento do *frontend* com recurso à *framework* Angular, uma *framework open-source* em JavaScript muito utilizada no desenvolvimento de aplicações *web*. Visando uma estrutura funcional e amigável do utilizador, foi desenvolvido um código de comunicação entre *frontend* e *backend* com o intuito de, por um lado, transferir os dados de entrada para viabilizar o processo de seleção e, posteriormente, proceder à apresentação de resultados.

3.2 MODELO DE BASE DE DADOS

3.2.1 INTRODUÇÃO

Quando se inicia o desenvolvimento de um novo sistema, uma das primeiras etapas a ser realizada é o estudo e levantamento de requisitos necessários para a construção do produto final. Neste primeiro passo, procura-se identificar as principais partes envolvidas, suas características e como elas interagem entre si. A partir das informações obtidas, elabora-se um modelo que será utilizado para orientar o projeto e o desenvolvimento da base de dados. Tendo em vista uma pesquisa adequada de sinais sísmicos em conformidade com critérios estabelecidos pelo utilizador, a ferramenta faz recurso a um modelo de base de dados, no qual se encontram armazenados e estruturados os dados mais relevantes para a análise pretendida, extraídos da base de dados PEER NGA.

Um modelo de base de dados é um conjunto de regras e métodos que permite representar conjuntos de dados, definindo as relações entre cada um deles. Este modelo pretende facilitar a perceção da lógica da estrutura de uma base de dados, incluindo as relações e restrições que determinam de que forma os dados

são armazenados, acedidos e processados num sistema de gestão de base de dados. A idealização de um modelo de base de dados é uma prática comum entre os programadores e os cientistas de bases de dados, uma vez que serve como suporte no projeto e na conceção de uma base de dados.

Estes modelos encontram-se divididos em dois grupos: os modelos conceptuais (ou baseados em objetos) e os modelos de implementação (ou baseados em registos). O modelo conceptual é utilizado para obter uma descrição lógica da base de dados e fornece uma visão aproximada de como os utilizadores visualizam os dados. Este modelo manifesta-se de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer base de dados e é representado pelo modelo de entidade-relação. O modelo de implementação permite descrever a forma como os dados estão representados num sistema gestor de base de dados. Este pode ser dividido em três tipos de modelo: hierárquico, em rede e relacional.

No modelo hierárquico, que foi o primeiro modelo de dados criado, os dados são estruturados em árvores e possuem registos relacionados através de uma estrutura hierárquica do tipo pai-filhos, com vários níveis, na qual cada registo pai pode relacionar-se com um ou mais registos filhos, ao passo que cada filho pode, unicamente, relacionar-se com o seu pai, estabelecendo-se assim uma relação hierárquica clara. O modelo em rede surgiu como uma extensão do modelo hierárquico, eliminando o conceito de hierarquia, tendo em vista que tal modelo permite que um registo filho possa estar associado a mais que um registo pai. Já o modelo relacional, cuja estrutura é formada por múltiplas tabelas que se relacionam entre si, é o mais amplamente utilizado desde a sua idealização, que se deu na década de 70 do século passado. Este modelo, pela sua simplicidade e grande capacidade de resposta face às necessidades dos utilizadores, constitui um marco revolucionário na conceção de bases de dados. Por ser o modelo de dados mais flexível e adequado à solução de problemas que surgem ao nível da conceção e implementação de uma base de dados, será precisamente este o eleito na criação do modelo de dados para a ferramenta desenvolvida no âmbito desta dissertação.

3.2.2 BASE DE DADOS PEER NGA

A base de dados PEER NGA é desenvolvida num tipo de base de dados designado por *flat-file*, o qual armazena a totalidade dos dados numa tabela única, ao contrário do modelo relacional, o qual recorre a várias tabelas e relações, aspeto apresentado em detalhe na subsecção 3.2.4 da presente dissertação. Neste modo de armazenamento, o banco de dados é considerado “plano” (*flat*) pelo facto de os dados não serem estruturados e de não existirem relações entre os mesmos. A base de dados PEER NGA é suportada pelo Microsoft Excel (Fig. 3.1), permitindo assim uma interação fácil e acessível com o utilizador.

3.2.3 MODELO DE ENTIDADE-RELAÇÃO

O Modelo de Entidade-Relação (também designado por Modelo ER, ou simplesmente MER) é um modelo conceptual, utilizado na Engenharia de Software durante a fase de projeto conceptual de dados, para representar os objetos (entidades) envolvidos num problema, as suas características (atributos) e as relações que se estabelecem entre si (relações). Este modelo corresponde a um modelo lógico que traduz a abstração da realidade e que representa a estrutura que possuirá a base de dados da aplicação.

De modo a alcançar um melhor entendimento das diferentes partes interessadas no projeto, os Modelos ER são definidos de forma gráfica, facilitando por essa via uma melhor interpretação das relações entre as diferentes entidades. Este modelo é ideal para projetar uma base de dados, que, seguidamente, pode ser transformado em tabelas no modelo relacional. Os elementos estruturais de um modelo conceptual de dados são explicados nas subsecções subsequentes, estando representados graficamente na Fig. 3.2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	
	Record Sequence Number	EQID	Earthquake Name	YEAR	MO	DAY	STATION NAME	Station Sequence Number	Station ID No	Earthquake Magnitude	Magnitude Type	Magnitude Uncertainty Kagan Model	Magnitude Uncertainty Statistical	Magnitude Sample Size	Magnitude Uncertainty Study Class	Mo (dyne cm)	Strike (deg)	Dip (deg)	Rake Angle (deg)	Mechanism Based on Rake Angle	P-plunge (deg)	P-trend (deg)	T-plunge (deg)	T-trend (deg)	
1	1	0001	Helena, Montana-01	1935	10	31	1938 Carroll College	197	2022	6.00		0.3000				0.3	1.1220E+25	268	75	160	0	2.9	316.3	24.6	22
2	2	0002	Helena, Montana-02	1935	10	31	1918 Helena Fed Bldg	198	2229	6.00	U	0.3000				0.3	1.1220E+25								
3	3	0003	Humboldt Bay	1937	02	07	0442 Femdale City Hall	133	1023	5.80		0.3000				0.3	5.6234E+24								
4	4	0004	Imperial Valley-01	1938	06	06	0242 El Centro Array #9	75	117	5.90	U	0.3000				0.3	3.5481E+23								
5	5	0005	Northwest Calif-01	1938	09	12	0610 Femdale City Hall	133	1023	5.50		0.3000				0.3	1.9953E+24								
6	6	0006	Imperial Valley-02	1940	05	19	0437 El Centro Array #9	75	117	6.95		0.3000	0.072	8	0.2	2.9845E+26	323	80	180	0	7.0	187.5	7.1	27	
7	7	0007	Northwest Calif-02	1941	02	09	0945 Femdale City Hall	133	1023	6.60	U	0.3000				0.3	8.9125E+25								
8	8	0008	Northwest Calif-01	1941	08	03	1614 Femdale City Hall	133	1023	6.40	U	0.3000				0.3	4.4668E+25								
9	9	0009	Borrego	1942	10	21	1622 El Centro Array #9	75	117	6.50	U	0.3000				0.3	6.3098E+25	40	90	0	0	0.0	175.0	0.0	6
10	10	0010	Imperial Valley-03	1951	01	24	0717 El Centro Array #9	75	117	5.60	U	0.3000				0.3	2.8184E+24	325	90	0	0	0.0	100.0	0.0	1
11	11	0011	Northwest Calif-03	1951	10	08	0411 Femdale City Hall	133	1023	5.80		0.3000				0.3	5.6234E+24								
12	12	0012	Kern County	1952	07	21	1153 LA - Hollywood Stor FF	326	24303	7.36		0.3000	0.145	9	0.2	1.2303E+27	51	75	61	2	24.5	163.1	51.3	26	
13	13	0012	Kern County	1952	07	21	1153 Pasadena - CIT Athenaeum	499	80053	7.36		0.3000	0.145	9	0.2	1.2303E+27	51	75	61	2	24.5	163.1	51.3	26	
14	14	0012	Kern County	1952	07	21	1153 Santa Barbara Courthouse	92	283	7.36		0.3000	0.145	9	0.2	1.2303E+27	51	75	61	2	24.5	163.1	51.3	26	
15	15	0012	Kern County	1952	07	21	1153 Taft Lincoln School	148	1095	7.36		0.3000	0.145	9	0.2	1.2303E+27	51	75	61	2	24.5	163.1	51.3	26	
16	16	0013	Northwest Calif-02	1952	09	22	1141 Femdale City Hall	133	1023	5.20		0.3000				0.3	7.0795E+23								
17	17	0014	Southern Calif	1952	11	22	0746 San Luis Obispo	147	1083	6.00	U	0.3000				0.3	1.1220E+25								
18	18	0015	Imperial Valley-04	1953	06	14	0417 El Centro Array #9	75	117	5.50	U	0.3000				0.3	1.9953E+24								
19	19	0016	Central Calif-01	1954	04	25	2033 Hollister City Hall	135	1028	5.30	U	0.3000				0.3	1.0000E+24								
20	20	0017	Northwest Calif-03	1954	12	21	1956 Femdale City Hall	133	1023	6.50	U	0.3000				0.3	6.3098E+25								
21	21	0018	Imperial Valley-05	1955	12	17	0607 El Centro Array #9	75	117	5.40	U	0.3000				0.3	1.4125E+24								
22	22	0019	El Alamo	1956	02	09	1433 El Centro Array #9	75	117	6.80	U	0.3000				0.3	1.7783E+26	288	88	176	0	1.4	333.1	4.3	24
23	23	0020	San Francisco	1957	03	22	1944 Golden Gate Park	150	1117	5.28		0.3000	0.045	4	0.3	9.3325E+23	119	75	80	2	29.3	217.1	58.8	1	
24	24	0021	Central Calif-02	1960	01	20	0326 Hollister City Hall	135	1028	5.00	U	0.3000				0.3	3.5481E+23								
25	25	0022	Northwest Calif-04	1960	06	06	0117 Femdale City Hall	133	1023	5.70		0.3000				0.3	3.9811E+24								
26	26	0023	Hollister-01	1961	04	09	0723 Hollister City Hall	135	1028	5.60	U	0.3000				0.3	2.8184E+24								
27	27	0024	Hollister-02	1961	04	09	0725 Hollister City Hall	135	1028	5.50	U	0.3000				0.3	1.9953E+24								
28	27		Flatfile																						

Fig. 3.1 – PEER NGA flat-file

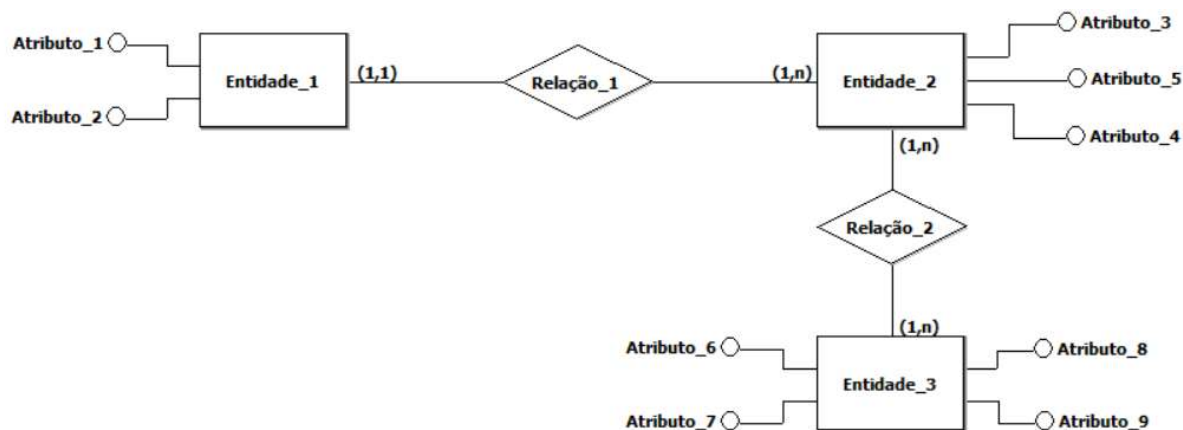


Fig. 3.2 - Esquema gráfico do MER, representando entidades, atributos e relações

3.2.3.1 Entidades

As entidades representam uma abstração elaborada para a descrição de um grupo de objetos ou conceitos do mundo real, podendo ser classificadas em dois tipos de acordo com sua existência: i) as entidades físicas, que são aquelas tangíveis, existentes e visíveis no mundo real, tais como por exemplo um cliente ou um produto; ii) as entidades lógicas, que decorrem da interação entre entidades físicas, mas que no mundo externo não são um objeto físico, como por exemplo uma venda de um produto para um cliente.

Relativamente à ferramenta em questão, foram identificadas quatro entidades: Sismo (Earthquake), Estação (Station), Acelerograma (Accelerogram) e Registo (Record). As entidades Sismo e Estação são entidades físicas, ao passo que Acelerograma e Registo representam entidades lógicas, tendo em vista

que um acelerograma e um registo são dependentes tanto do sismo quanto da estação que o regista e, por esse motivo, decorrem de uma interação entre duas entidades físicas.

3.2.3.2 Atributos

Os atributos são elementos ou propriedades escolhidas para caracterizar uma entidade. Durante a análise e definição de requisitos, são identificados os atributos mais relevantes de cada entidade condicionados a um certo contexto, de modo a tornar o modelo o mais simples possível, armazenando, somente, os dados que serão essenciais para o cenário em estudo. A título de exemplo, um cliente (entidade) possui nome, morada, telefone, altura, peso (atributos). Para o sistema de uma clínica médica, os atributos peso e altura podem ser relevantes, no entanto, para o sistema de um supermercado, estas informações dificilmente serão pertinentes. Cada entidade possui um atributo identificador, que é aquele atributo capaz de identificar exclusivamente cada ocorrência de uma entidade.

O modelo de base de dados referente à aplicação desenvolvida para este trabalho foi pensado de forma a conter as principais informações sobre um sismo de modo a possibilitar a análise dinâmica de uma estrutura sujeita a ações sísmicas. Tais informações referem-se aos atributos selecionados para caracterizar a respetiva entidade. O modelo de base de dados pensado para a ferramenta de seleção de sinais sísmicos apresenta um conjunto de atributos que a seguir serão comentados de modo a facilitar o entendimento do diagrama de entidade-relação, exposto na subseção 3.2.3.4.

A entidade Sismo é caracterizada por dez atributos, sendo eles: i) o código do evento sísmico (*id*), que representa um código único correspondente a cada sismo para fins de identificação (atributo identificador). No modelo baseado na base de dados PEER NGA, este código varia de 1 a 173; ii) o nome identificativo do sismo (representado no diagrama como *eq_name*), que inclui o nome da área ou do país onde o abalo ocorreu. No caso de múltiplos sismos numa mesma região, são usados números de forma a distinguir estes eventos; iii) o ano do sismo (*eq_year*); iv) a data do sismo, no que se refere a mês e dia (*date*); v) a hora e o minuto em que o sismo ocorreu (*time*), vi) a magnitude do sismo (*magnitude*). No caso de haver múltiplas estimativas fiáveis da magnitude de um sismo, é tomado um valor médio; vii) o mecanismo de rotura do sismo baseado no *rake angle* (*mechanism*), que é o ângulo medido no plano da falha no sentido anti-horário desde a direção de referência até à direção média de deslizamento, tal como ilustrado na Fig. 3.3 ($-180^\circ \leq \text{Rake} \leq 180^\circ$). A classe de mecanismo é classificada de 0 a 4 em função do *rake angle* (ver Quadro 3.1); viii) a latitude do hipocentro (*latit*), que é o local no interior da terra onde se inicia a rotura do material rochoso, ou seja, onde se inicia o processo de libertação energética (Fig. 3.4); ix) a longitude do hipocentro (*longit*); x) a profundidade do hipocentro (*depth*).

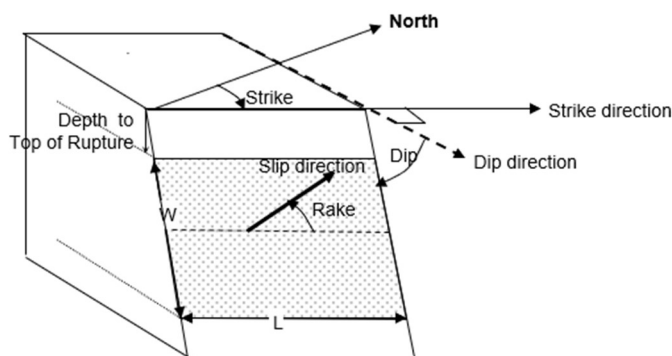


Fig. 3.3 – Rake Angle

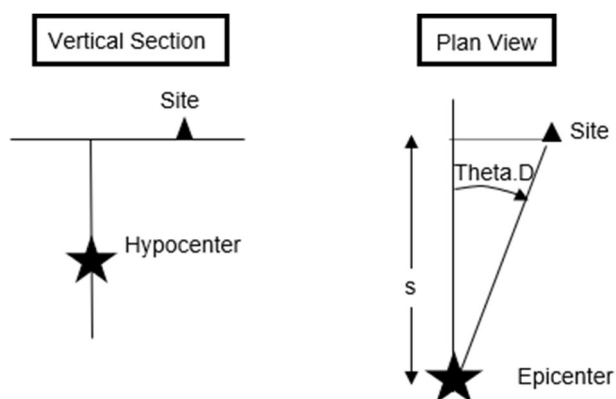


Fig. 3.4 - Representação esquemática de hipocentro e de epicentro

Quadro 3.1 – Valores do mecanismo de rotura

Tipo	Classe de Mecanismo	Rake Angle
Strike - Slip	0	$-180^\circ < \text{Rake} < -150^\circ$
		$-30^\circ < \text{Rake} < 30^\circ$
		$150^\circ < \text{Rake} < 180^\circ$
Normal	1	$-120^\circ < \text{Rake} < -60^\circ$
Reverse	2	$60^\circ < \text{Rake} < 120^\circ$
Reverse - Oblique	3	$30^\circ < \text{Rake} < 60^\circ$
		$120^\circ < \text{Rake} < 150^\circ$
Normal - Oblique	4	$-150^\circ < \text{Rake} < -120^\circ$
		$-60^\circ < \text{Rake} < -30^\circ$

A entidade Estação foi tipificada em cinco atributos, dos quais um é condizente com o código de identificação (*id*) da estação sísmica. No modelo baseado na base de dados PEER NGA, o *id* da entidade Estação varia de 1 a 1455. Seguindo a linha de raciocínio já apresentada na seleção dos atributos para a entidade Sismo, é também relevante armazenar informação acerca do nome da estação (*station_name*), bem como da sua posição geográfica, indicando latitude (*latit*) e longitude (*longit*). Outro fator importante na caracterização de uma estação é o enquadramento geotécnico de modo a atender a efeitos de amplificação local. No presente contexto, o cenário geotécnico é atendido e englobado através do parâmetro VS_{30} , que corresponde à média ponderada da velocidade de propagação das ondas de corte nos 30 metros superiores do perfil geotécnico onde se encontra posicionada a estação.

A entidade Acelerograma possui, da mesma forma, um atributo identificador que se refere ao código de identificação (*id*) do acelerograma. Um acelerograma é aqui considerado como um conjunto de registos de um sismo registado por uma determinada estação em duas ou três direções ortogonais. No modelo baseado na base de dados PEER NGA, conforme já mencionado, a combinação entre os 173 sismos e as 1455 estações dá origem a um cadastro de 3551 registos sísmicos, tendo em linha de conta que um

sismo pode ser registado em mais de uma estação, assim como uma estação pode também apresentar registos alusivos a vários sismos. Deste modo, o *id* do acelerograma varia de 1 a 3551. Como a entidade Acelerograma possui um cadastro com 3551 registos sísmicos, e cada um desses registos é caracterizado por duas componentes horizontais e ortogonais de aceleração e, na maior parte das vezes contemplando ainda o registo da componente vertical, sendo tais componentes representadas no cadastro da entidade Registo, considerou-se que os dados referentes às acelerações desta entidade se referem à média geométrica das componentes horizontais de aceleração, armazenadas na entidade Registo. Abordagem semelhante é também adotada para velocidades e deslocamentos. Deste modo, as informações sobre acelerações, velocidades e deslocamentos disponíveis na entidade Acelerograma são úteis somente no que concerne a análises tridimensionais, critério este selecionado de acordo com a finalidade da análise do utilizador, tendo em vista que este tipo de análise leva em consideração a média das componentes horizontais das acelerações, velocidades ou deslocamentos.

Para além do atributo identificador, existem mais onze atributos na entidade Acelerograma, são estes: i) distância epicentral (no diagrama de entidade-relação, vem representada por *distance_epi*), que corresponde à distância entre o epicentro do sismo e a estação; ii) distância hipocentral (*distance_hyp*), condizente com a distância do hipocentro do sismo à estação; iii) distância Joyner-Boore (*distance_jb*), correspondente à menor distância entre a estação e a projeção vertical da rotura; iv) distância Campbell (*distance_campbell*), que é a menor distância entre a estação e a parte sismogénica da superfície de rotura, que condiz a uma camada que cobre a faixa de profundidade dentro da crosta na qual se origina a maioria dos sismos; v) distância mais próxima (*distance_closest*), que diz respeito à menor distância entre a estação e o plano de rotura. Visando propiciar o entendimento gráfico destas distâncias, considere-se o ilustrado na Fig. 3.5; vi) média geométrica da aceleração de pico do terreno (*PGA_hor_geomean*), a qual corresponde à média geométrica das componentes horizontais de aceleração do solo medida quando a rigidez de um sistema de um grau de liberdade tende a infinito, ou seja, quando o período é muito próximo de zero; vii) média geométrica da velocidade de pico do terreno (*PGV_hor_geomean*), aplicando um pensamento análogo ao item anterior; viii) média geométrica do deslocamento de pico do terreno (*PGD_hor_geomean*); ix) média geométrica do espectro de acelerações (*sa_geomean*), apresentando um valor médio de aceleração a cada 0.01 segundos num período de 10 segundos; x) média geométrica do espectro de velocidades (*sv_geomean*); xi) média geométrica do espectro de deslocamentos (*sd_geomean*).

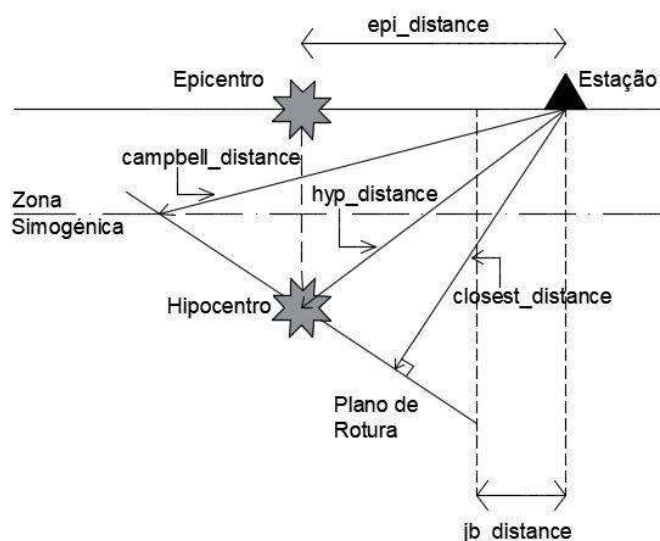


Fig. 3.5 - Representação gráfica das distâncias sísmicas, atributos da entidade Acelerograma

De modo semelhante às restantes entidades, a entidade Registo possui um atributo identificador, que é um código de identificação (*id*) de cada registo. Esta entidade engloba mais treze atributos: i) direção (*direction*) das componentes sísmicas, podendo ser uma das duas direções principais horizontais ou direção vertical; ii) séries de acelerações no tempo (*accel_time_series*) registadas por um acelerómetro; iii) intervalo de tempo (*time_step*) em que são medidas as acelerações numa dada estação sísmica; iv) menor frequência útil (*lowest usable frequency – luf*), que é a frequência abaixo da qual o sinal fica abaixo da capacidade mínima necessária para uma receção satisfatória, alcançada por meio do processamento de sinais a fim de eliminar ruídos de vibrações ambientais; v) duração 25-75 (*duration_25_75*), condizente ao período de tempo que envolve a libertação de 25% a 75% da energia de um sismo; vi) duração 5-95 (*duration_5_95*), referente ao intervalo de tempo entre a libertação de 5% a 95% da energia de um sismo; vii) média dos períodos (*mean_period*), que é um valor médio do período da estrutura para o qual o sismo provoca maiores impactos; viii) aceleração de pico do terreno (*peak ground acceleration – PGA*), que corresponde à aceleração de pico induzida por cada uma das componentes direcionais num sistema de um grau de liberdade com uma rigidez infinita, ou seja, o período é muito próximo de zero, o que significa que não ocorre amplificação estrutural, sendo assim a resposta condizente com a excitação aplicada na base (solo); ix) velocidade de pico do terreno (*peak ground velocity – PGV*); x) deslocamento de pico do terreno (*peak ground displacement – PGD*); xi) espectro de acelerações (*sa*), que apresenta valores de aceleração espectrais a cada 0.01 segundos num período total de 10 segundos; xii) espectro de velocidades (*sv*); xiii) espectro de deslocamentos (*sd*).

3.2.3.3 Relações

Definidas as entidades e respetivos atributos, são estabelecidos os relacionamentos, ou seja, as relações de interação entre duas ou mais entidades, as quais são efetuadas por meio da ligação entre atributos em comum. As relações são definidas, regra geral, por ações. De acordo com a quantidade de objetos envolvidos em cada lado da relação, é possível definir três formas de classificação, designadas por cardinalidade: i) relação 1:1 (um para um), que é um tipo de relacionamento no qual cada uma das entidades envolvidas referencia, obrigatoriamente, apenas uma unidade da outra; por exemplo, numa base de dados de currículos de uma empresa, cada currículo refere-se a apenas um candidato, na medida que cada candidato possui apenas um currículo; ii) relação 1:n (um para muitos), no qual uma das entidades envolvidas pode fazer referência a várias unidades da outra, porém, do outro lado, cada uma das várias unidades referenciadas só pode estar ligada a uma unidade da outra entidade (por exemplo, um departamento, em geral, está associado a vários projetos, ao passo que um projeto somente está ligado a um departamento); iii) relação n:n (muitos para muitos), no qual cada entidade, de ambos os lados, pode referenciar múltiplas unidades da outra entidade (por exemplo, um médico pode atender muitos pacientes, à medida que um paciente pode ser atendido por vários médicos).

Atendendo ao acima ilustrado e focando na aplicação desenvolvida, compreende-se que é possível estabelecer diferentes tipos de relações entre as quatro entidades definidas na ferramenta em estudo. Refira-se que um acelerograma depende da ação de um sismo e da estação em que o mesmo é registado. A entidade Sismo estabelece uma relação com a entidade Acelerograma de um para muitos, visto que um sismo pode estar associado a mais do que um acelerograma, dado que um mesmo evento pode ser registado em mais do que uma estação e, dessa forma, ser representado em múltiplos acelerogramas. O mesmo raciocínio é válido para a relação entre as entidades Estação e Acelerograma. As entidades Acelerograma e Registo estabelecem entre si, da mesma forma, uma relação de um para muitos, tendo em vista que um acelerograma pode relacionar-se a dois registos (registos de acelerações nas duas direções principais horizontais) ou a três registos (registos de acelerações nas duas direções principais horizontais e na direção vertical), ao passo que cada registo está associado a apenas um acelerograma.

3.2.3.4 Diagrama de Entidade-Relação

O Diagrama de Entidade-Relação (Diagrama ER ou ainda DER) é a representação gráfica e principal ferramenta do modelo conceptual de Entidade-Relação. O modelo descrito anteriormente pode sofrer de abstração em virtude de não apresentar uma forma de visualização da informação. Assim sendo, o diagrama é tido muitas vezes como sinónimo do próprio modelo. O diagrama ER facilita a comunicação e o entendimento entre os integrantes de uma equipa, pois oferece uma linguagem comum utilizada tanto por quem estabelece os requisitos necessários para a modelação, quanto por quem desenvolve a implementação daquilo que é prescrito.

Objetivando a elaboração de um DER, urge seguir algumas regras no que concerne à representação gráfica. Para tal, existem diversas notações, sendo a mais difundida e, atualmente, amplamente utilizada a proposta por Peter Chen [16], sendo composta por entidades (retângulos), relações (losangos), atributos (círculos), em que o atributo identificador tem o círculo destacado, e linhas de conexão (linhas), que indicam a cardinalidade de uma entidade numa relação, tal como ilustrado na Fig. 3.6.

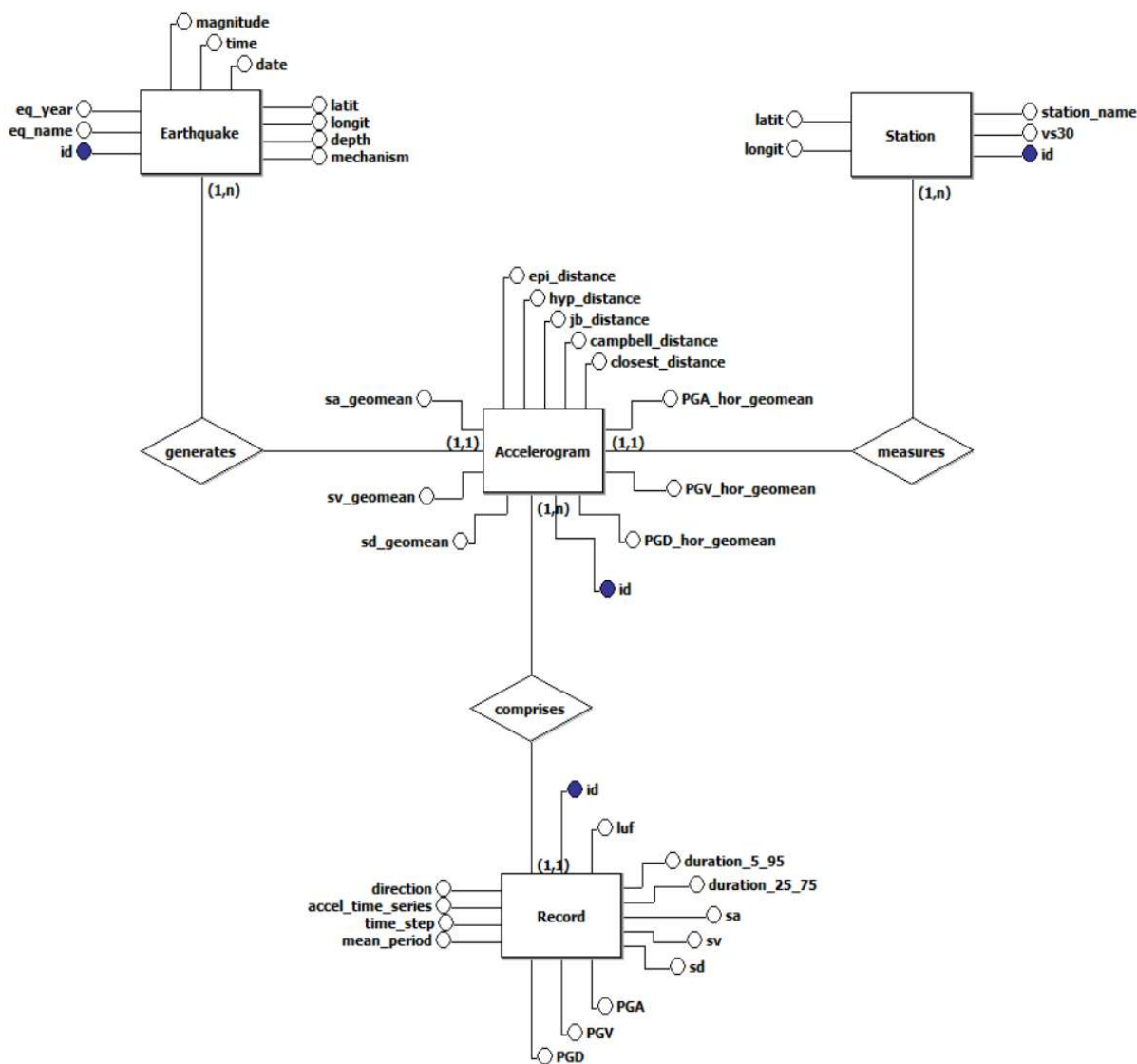


Fig. 3.6 - Diagrama de Entidade-Relação para a ferramenta desenvolvida

3.2.4 MODELO RELACIONAL

O modelo relacional é o modelo mais comum e mais amplamente utilizado desde a sua proposta conceção, que se deu na década de 70 do século passado. Este modelo serve como base para a implementação de uma base de dados. Para tornar possível a transferência dos dados dispostos no modelo de entidade-relação para uma base de dados real, é necessário transformar os diagramas ER em diagramas baseados no modelo relacional, o qual é constituído por relações, em que cada relação é uma tabela que representa as entidades do modelo de entidade-relação. Essa transformação denomina-se mapeamento, estando esquematicamente ilustrada na Fig. 3.7. As relações são mantidas por meio do armazenamento de um atributo em comum entre as tabelas, as quais consistem em um conjunto de atributos (colunas), que definem as características relevantes da entidade que representam. Cada linha da tabela, também designada por entrada, caracteriza um elemento único que contém uma coleção de dados relacionais. Tanto a ordem das entradas quanto a ordem dos atributos numa relação são tidas como irrelevantes.

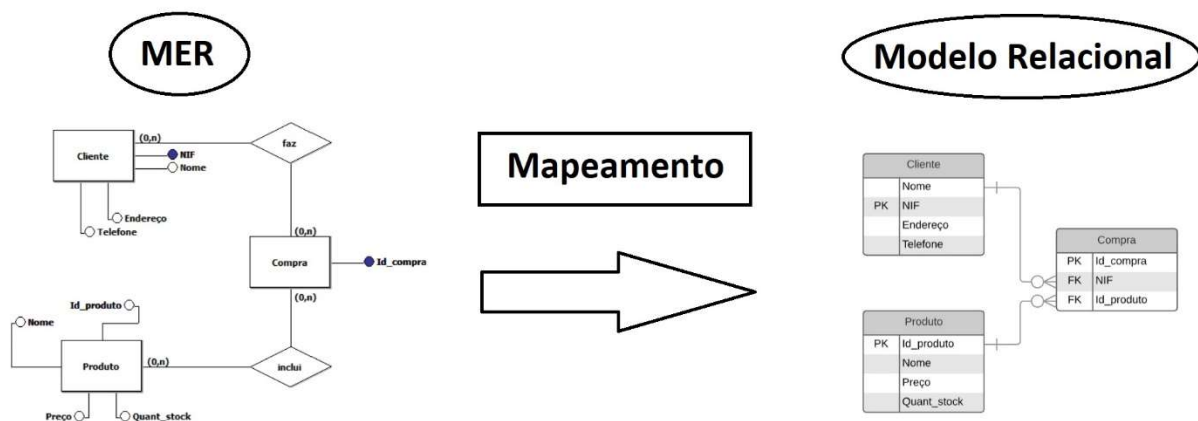


Fig. 3.7 - Mapeamento do MER para o Modelo Relacional

No contexto de bases de dados relacionais, é comum classificar alguns atributos como chaves primárias ou como chaves externas (ou estrangeiras). Alguns atributos representam valores únicos que identificam a entidade dentro do domínio, sendo estes designados por chave primária (*primary key*), o que equivale ao atributo identificador do modelo ER. Os atributos que se referenciam a outros são denominados de chave externa (*foreign key*) e geralmente estão ligados à chave primária da outra entidade, permitindo assim a consulta de uma chave primária em outras tabelas. A título de exemplo, num cadastro de clientes, a chave primária na entidade Cliente poderia ser o número de contribuinte (NIF), enquanto que na entidade Compra também existiria um atributo referente ao número de contribuinte, o qual se relaciona com o campo NIF da entidade cliente, visando assim identificar que cliente fez uma determinada compra. Da mesma forma, a entidade Compra possui uma chave estrangeira do código do produto vendido, a qual se relaciona com o campo referente a este código na entidade Produto, na qual é chave primária, visando identificar que produto foi vendido naquela compra. Em geral, na representação gráfica, ao lado das chaves primárias e externas, são expostas as iniciais PK (*primary key*) e FK (*foreign key*), respetivamente, conforme esquematicamente ilustrado na Fig. 3.8.

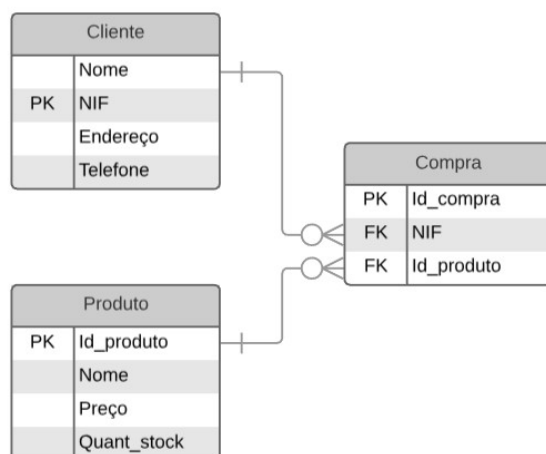


Fig. 3.8 - Esquema simplificado de atributos e chaves primária e estrangeira

No contexto da ferramenta, no que se refere ao mapeamento da tabela Acelerograma, cada cadastro de acelerograma está ligado a um sismo e a uma estação. Deste modo, existirão dois atributos (colunas) referentes ao sismo (*id_earthquake*) e à estação (*id_station*) nesta tabela, tal como apresentado na Fig. 3.9, o que faz destes atributos chaves externas. Já na tabela Registo, cada entrada está ligada a um acelerograma por meio de uma chave externa (*id_accelerogram*).

	123 id	123 id_earthquake	123 id_station	123 distance_campbell	123 distance_closest	123 distance_epi
1	1	1	177	0.0000	0.0000	6.3100
2	2	2	427	0.0000	0.0000	6.3100
3	3	3	367	0.0000	0.0000	73.4900
4	4	4	348	0.0000	0.0000	33.2000
5	5	5	367	0.0000	0.0000	54.8800
6	6	6	348	7.5100	6.0900	12.9900
7	7	7	367	0.0000	0.0000	97.0000
8	8	8	367	0.0000	0.0000	49.4900
9	9	9	348	0.0000	0.0000	57.7900
10	10	10	348	0.0000	0.0000	28.2400
11	11	11	367	0.0000	0.0000	55.9600
12	12	12	670	117.7500	117.7500	118.2600
13	13	12	918	125.5900	125.5900	125.8100
14	14	12	1,047	82.1900	82.1900	88.3900
15	15	12	1,151	38.8900	38.8900	43.4900
16	16	13	367	0.0000	0.0000	43.8300
17	17	14	1,037	0.0000	0.0000	76.2700
18	29	25	195	6.9600	6.2800	31.0400
19	30	25	196	10.0400	9.5800	32.5600
20	31	25	197	13.2400	12.9000	34.0100
21	18	15	348	0.0000	0.0000	15.7600
22	19	16	443	0.0000	0.0000	26.8300
23	20	17	367	0.0000	0.0000	30.7900
24	21	18	348	0.0000	0.0000	14.7800
25	22	19	348	0.0000	0.0000	121.2200
26	23	20	408	0.0000	0.0000	11.1300
27	24	21	443	0.0000	0.0000	8.0100
28	25	22	367	0.0000	0.0000	58.7800
29	26	23	443	0.0000	0.0000	20.6100
30	27	24	443	0.0000	0.0000	18.9200
31	28	25	194	17.9000	17.6400	36.1800

Fig. 3.9 - Parte da tabela Acelerograma

3.2.4.1 Normalização do Modelo Relacional de Base de Dados

Visando uma base de dados com o mínimo de redundâncias ou anomalias possível, a adequação da base de dados conta, em geral, com a avaliação de cinco regras, que recebem o nome de formas normais. No entanto, nem sempre é necessário normalizar uma base de dados até à última (quinta) forma normal, sendo considerada uma base de dados normalizada no caso de aderir, pelo menos, até à terceira forma normal. Desde a elaboração do modelo ER, os atributos indicados na subsecção 3.2.3.2 foram estabelecidos visando a conceção de um modelo de base de dados normalizado, pese embora o conceito de normalização de uma base de dados estar apenas associado ao modelo relacional de base de dados. Deste modo, este processo de normalização consiste em examinar os atributos de uma entidade, procurando dessa forma a garantia da consistência dos dados.

A primeira forma normal (1NF) corresponde a uma restrição inicial que remete à atomicidade dos atributos, ou seja, os atributos não podem possuir mais do que um valor para um determinado cadastro, além de não serem admitidas repetições de campos. Já para uma relação estar na segunda forma normal (2NF), é necessário que dê cumprimento aos condicionalismos da 1NF e que todos os atributos não-chave sejam totalmente dependentes da chave primária. Por sua vez, um esquema relacional encontra-se na terceira forma normal (3NF) se, dando cumprimento aos requisitos da 2NF, não houver dependência entre os atributos não-chave.

Face ao agora exposto e atendendo aos atributos selecionados no modelo de entidade-relação, verifica-se que o modelo concebido está normalizado pois cumprem-se as exigências da terceira forma normal, dado que não existe atributo algum que seja multi-valor (que possua mais de um valor num campo), não existem repetições de atributos, todos os atributos não-chave dependem única e exclusivamente da chave primária, não se verificando dependências funcionais entre atributos que não são pertencentes a uma chave.

3.2.4.2 Diagrama do Modelo Relacional

Considerando o que foi descrito anteriormente relativamente às entidades e aos atributos do modelo ER, bem como à conversão deste modelo em uma estrutura de tabelas e sua consequente normalização, atendendo às denominadas por chaves primárias e externas, foi desenvolvido o diagrama que servirá como base na implementação da base de dados, tal como ilustrado na Fig. 3.10.

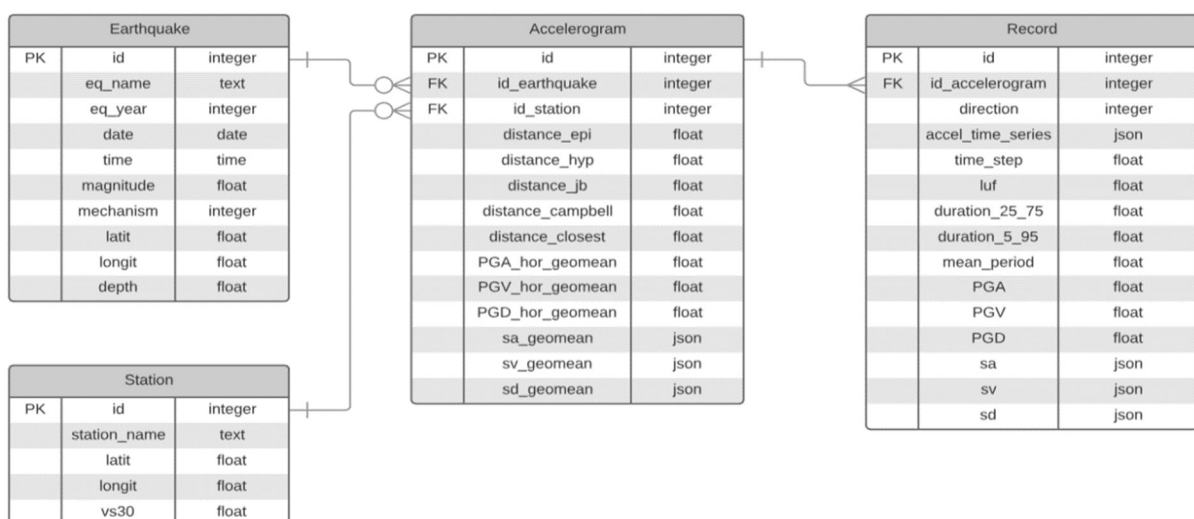


Fig. 3.10 - Diagrama do Modelo Relacional

3.3 SISTEMA DE GESTÃO DE BASE DE DADOS

Depois de estabelecido o diagrama do modelo relacional, urge a implementação de todas as informações num sistema de gestão de base de dados, que consiste num *software* que possibilita a criação da base de dados e gere o armazenamento, a manipulação e a pesquisa dos dados existentes num banco de dados, funcionando como uma ligação entre a aplicação e os dados necessários para a sua execução.

O sistema de gestão de base de dados utilizado nesta ferramenta foi o *PostgreSQL*, que é um sistema robusto, rápido e de livre acesso, atendendo ao requisito de possibilitar, no futuro, a inclusão de diferentes bases de dados no sistema. Tal como existem vários sistemas de gestão de dados, também existem vários clientes SQL que possibilitam gerir as bases de dados e respetivas informações. A ferramenta escolhida como cliente foi o *DBeaver*, uma ferramenta multiplataforma *open-source* que suporta um conjunto vasto de sistemas de gestão de base de dados e que possui uma interface amigável ao utilizador (ver Fig. 3.11).

id	station_name	vs30	latit	longit
1	'12440 Imperial Hwy. North Grn'	274.5000	33.9150	-118.0660
2	'2516 Via Tejon PV'	280.6000	33.8010	-118.3870
3	'Abbar'	724.0000	36.9200	-48.9500
4	'Abeno'	256.0000	34.6360	135.5190
5	'Abhar'	274.5000	36.1500	-49.2200
6	'Aeropuerto Mexicali'	274.5000	32.6510	-115.3320
7	'Afyon Bay'	-1.0000	38.7920	30.5610
8	'Agnews State Hospital'	239.7000	37.3970	-121.9520
9	'Agrarias'	274.5000	32.6210	-115.3010
10	'Alameda - Oakland Airport FS #4'	202.5000	37.7380	-122.2530
11	'Alameda Fire Station #1'	297.9000	37.7630	-122.2440
12	'Alameda Naval Air Stn Hanger'	190.0000	37.7850	-122.3030
13	'Alhambra - Fremont School'	550.0000	34.0700	-118.1500
14	'Alhambra - LA Co PW HQ FF'	370.8000	34.0842	-118.1520
15	'Almires'	338.6000	39.1810	-22.7560
16	'ALP (temp)'	376.1000	36.0109	-120.2530
17	'Alpine Fire Station'	659.6000	32.8380	-116.7750
18	'ALS'	553.4000	23.5103	120.8052
19	'Altadena - Eaton Canyon'	370.8000	34.1770	-118.0960
20	'Amagasaki'	256.0000	34.7180	135.4080
21	'Ambarli'	175.0000	40.9805	28.6920
22	'Amboy'	271.4000	34.5600	-115.7430
23	'Ambralaui'	274.5000	42.5215	43.1549
24	'Anacapa Island'	821.7000	34.0160	-119.3620
25	'Anaheim - Brookhurst & Crescent'	270.2000	33.8400	-117.9570
26	'Anaheim - Hwy 91 & Weir Cyn Rd'	376.1000	33.8630	-117.7420
27	'Anaheim - Lakeview & Riverdale'	345.4000	33.8540	-117.8170
28	'Anaheim - W Ball Rd'	234.9000	33.8170	-117.9510
29	'Anavere Valley - City R'	446.0000	34.5800	-118.1990
30	'Anchorage - Aho Res (Basement)'	274.5000	61.1959	-149.9465
31	'Anchorage - DOI Off. of Aircraft'	279.4000	61.1779	-149.9657
32	'Anchorage - Dowd Eng Warehouse'	360.0000	61.1832	-149.8853
33	'Anchorage - K2-02'	366.0000	61.2240	-149.8074
34	'Anchorage - K2-03'	474.0000	61.2204	-149.7433
35	'Anchorage - K2-04'	279.4000	61.1770	-150.0100
36	'Anchorage - K2-05'	284.0000	61.2000	-149.9110
37	'Anchorage - K2-06'	491.0000	61.1910	-149.8220
38	'Anchorage - K2-07'	270.0000	61.1600	-150.0010
39	'Anchorage - K2-08'	274.0000	61.1770	-149.9190

Fig. 3.11 – Interface gráfica do *software* DBeaver para gestão da base de dados

3.4 FRAMEWORK PARA SELEÇÃO E ESCALAMENTO DE REGISTOS SÍSMICOS

Uma versão protótipo preliminar da ferramenta apresentada neste trabalho havia já sido desenvolvida na Universidade do Porto [17], a qual permitia apenas a seleção de registos individuais baseada na compatibilidade com o espectro alvo de resposta. O avanço das tecnologias e o progresso dos estudos no que concerne à seleção de sinais sísmicos para análise dinâmica permitiram o desenvolvimento de uma *framework* para seleção e escalamento de registos sísmicos (SeEQ), baseada em técnicas de seleção e de otimização avançadas. A presente dissertação expõe uma aplicação *web* desta *framework*, cuja conceção segue uma abordagem modular e extensível, permitindo assim a adição de novas funcionalidades sem comprometer o funcionamento do código existente. No estágio atual de

desenvolvimento, a ferramenta SeIEQ engloba quatro módulos: i) seleção preliminar, ii) espectro alvo e iii) critérios de agrupamento de sinais, iv) requisitos sobre a direção da análise a ser feita. Todos estes módulos estão integrados numa interface gráfica *user-friendly*.

A aplicação *web* é composta por duas camadas, designadas na terminologia anglo-saxónica por *frontend* e *backend*, que comunicam entre si através do protocolo HTTP. O *frontend* é responsável por toda a interação com o utilizador, tendo sido desenvolvido de modo a proporcionar uma interação tão amigável (*user-friendly*) quanto possível. Este foi desenvolvido com recurso à *framework* Angular, uma *framework open-source* em JavaScript muito utilizada no desenvolvimento de aplicações *single page*. O *backend* é responsável por todo o complexo processo de seleção e cálculo. Este foi desenvolvido em linguagem Python, num paradigma orientado a objetos, com recurso à *framework Flask*, que possibilita a comunicação entre o *frontend* e o código desenvolvido em Python por meio de um pedido HTTP, disponibilizando uma API (interface de aplicação de programação) que permite a sua correta utilização independentemente da aplicação de *frontend* utilizada. Esta interação processa-se na seguinte sequência: o *frontend* realiza um pedido ao *backend*, que processa o pedido e responde com o resultado obtido.

3.4.1 ARQUITETURA DO SEIEQ

Conforme já foi mencionado, a plataforma SeIEQ é constituída por quatro módulos integrados, estando o seu funcionamento orgânico ilustrado na Fig. 3.12. O módulo da seleção preliminar estabelece a ligação à base de dados PEER NGA com o objetivo de proceder a uma pré-seleção de registos sísmicos, criando assim uma base de dados temporária com a informação filtrada. Com um conjunto de registos aptos para a seleção de sinais sísmicos, é então possível processar a seleção final baseada em código (*Run Selection*), de acordo com os parâmetros indicados pelo utilizador para a obtenção do espectro alvo e com os critérios de agrupamentos de sinais, atendendo às restrições de análise impostas pelo utilizador.

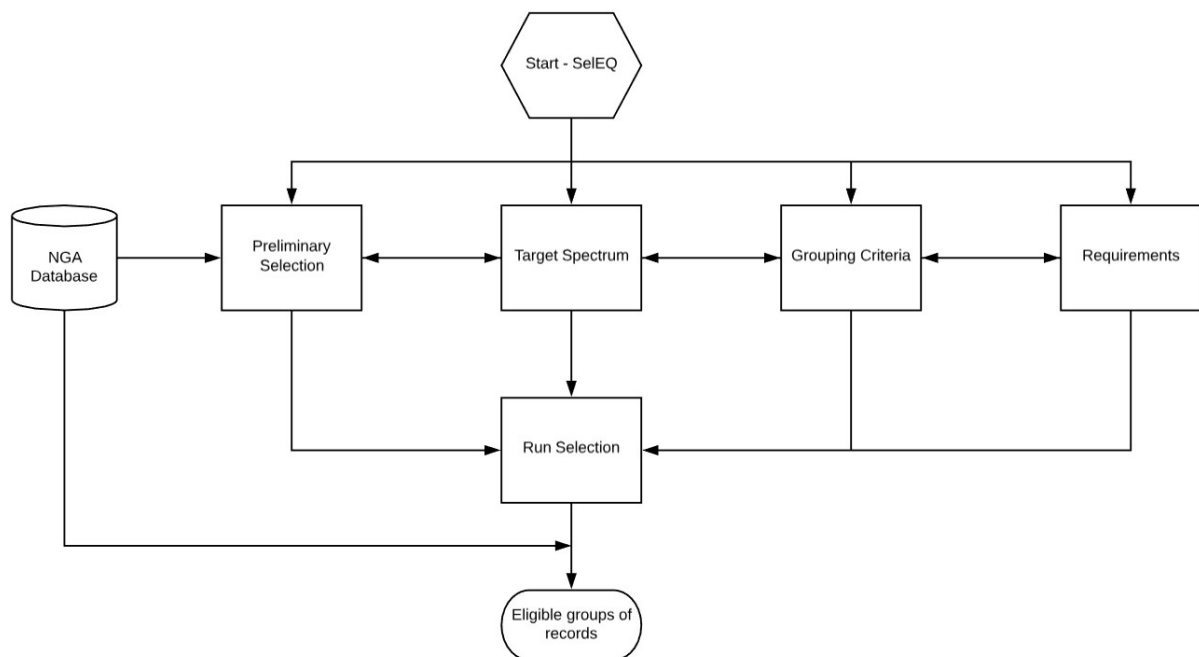


Fig. 3.12 – Arquitetura da framework SeIEQ

3.4.2 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS CONSTITUINTES DO SELEQ

A facilidade de utilização da *framework* SeleQ foi definida como um fator de relevância no desenvolvimento da interface gráfica do utilizador (em inglês representada pela sigla GUI, *Graphical User Interface*). A GUI da plataforma SeleQ consiste numa aplicação de página única contendo quatro diferentes separadores, os quais correspondem a cada um dos módulos indicados na Fig. 3.12.

Relativamente ao primeiro módulo, no qual o utilizador pode realizar uma seleção preliminar de registos sísmicos (*preliminary selection*), são definidos alguns critérios tidos como apropriados para a realização de uma seleção inicial. Entre estes critérios estão: i) a magnitude; ii) a distância epicentral; iii) o valor médio ponderado da velocidade de propagação de ondas de corte nos 30 metros mais superficiais do maciço (VS₃₀); iv) a aceleração de pico do terreno (PGA). Caso o utilizador selecione algum destes parâmetros, é pedido então o intervalo entre os valores mínimo e máximo aceitáveis para uma filtragem de dados adequada ao caso em apreço, tal como ilustrado na Fig. 3.13. Os filtros associados a estes parâmetros foram implementados pela *framework* SeleQ, de modo a permitir ao utilizador um maior refinamento no que concerne à pré-seleção de registos inerentes a uma base de dados, os quais serão utilizados na seleção final de registos.

The image shows the 'Preliminary Selection' tab of the SeleQ interface. It contains four criteria with checkboxes and input fields for minimum and maximum values:

- ☒ Magnitude: Min: 6, Max: 7
- ☐ VS30 [m/s]: (no values entered)
- ☒ Epicentral Distance [km]: Min: 90, Max: 100
- ☐ PGA [g]: (no values entered)

A 'Run Selection' button is located at the top right of the interface.

Fig. 3.13 – Interface gráfica do módulo de seleção preliminar

Após a seleção preliminar de registos sísmicos, o separador relativo ao espectro alvo (*target spectrum*) permite ao utilizador definir o espectro alvo, que, no âmbito específico da presente dissertação, é definido por meio de uma análise baseada no Eurocódigo 8 [1]. No entanto, devido à natureza modular que facilita a incorporação de novas funcionalidades posteriormente, poderão acrescentar-se outros tipos de definição do espectro alvo, como por exemplo o CMS (Espectro Médio Condicional, explanado na secção 2.3.4.2) ou o espectro definido pelo utilizador, no qual o utilizador define os pontos gráficos do espectro.

O terceiro módulo refere-se ao critério de agrupamento de sinais (*grouping criteria*) que é permitido numa seleção baseada em código. A plataforma SeleQ permite ao utilizador definir critérios de seleção adicionais, tais como: i) a gama de períodos de vibração dentro da qual se deve efetuar a compatibilidade espectral; ii) o desfasamento em percentagem entre o espectro alvo do código e a média aritmética do espectro de resposta; iii) o desfasamento individual em percentagem entre o espectro de resposta de cada registo individual e o espectro alvo de resposta; iv) o intervalo de fatores de escala admissíveis.

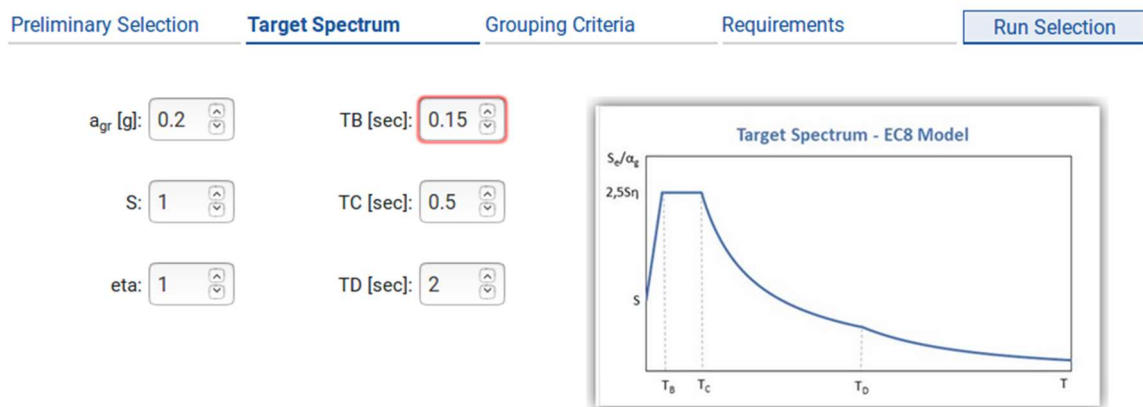


Fig. 3.14 - Interface gráfica do módulo do espectro alvo

A interface gráfica utilizada para definição destes critérios encontra-se ilustrada na Fig. 3.15. O fator de escala é um fator corretivo aplicado nos espectros dos sinais sísmicos a fim de que um espectro se aproxime do espectro alvo. Atendendo ao facto de a forma de um espectro depender tanto da magnitude do sismo bem como da distância entre o epicentro desse mesmo sismo e a estação onde foi efetuado o seu registo, um espectro de um sismo com uma certa magnitude poderia apresentar formas distintas, as quais dependeriam da distância epicentral. A título de exemplo, na hipótese de uma estação sísmica mais distante do epicentro, a sua intensidade medida seria menor do que no caso de um sismo próximo, dando origem a um espectro de menor ordenada, ou seja, com uma forma “mais achatada”. A relevância dos critérios adicionais de agrupamentos de sinais abrange vantagens referentes à possibilidade de realização de estudos paramétricos e de avaliação da influência da seleção de registos sísmicos na resposta estrutural.

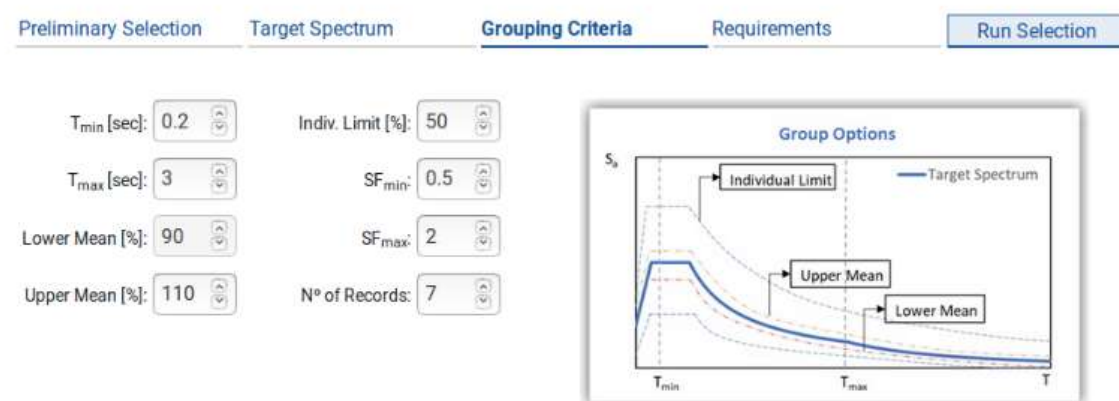


Fig. 3.15 – Interface gráfica do módulo de critérios de agrupamento

No quarto e último módulo, que diz respeito a requisitos necessários para a definição da análise sísmica, o utilizador é questionado se pretende efetuar uma análise bidimensional ou tridimensional e, também, se pretende também ter acesso às componentes verticais das acelerações registadas no domínio do tempo (*time series*) correspondentes aos sinais selecionados pela ferramenta (ver Fig. 3.16). A análise tridimensional é realizada ao assegurar a compatibilidade espectral entre o espectro alvo e a média aritmética das acelerações espectrais inerentes à tabela Acelerograma do conjunto de registos selecionados. Tais acelerações correspondem à média geométrica das duas componentes horizontais e ortogonais das acelerações à superfície do maciço, tal como já foi mencionado na subsecção 3.2.3.2.

Preliminary Selection Target Spectrum Grouping Criteria **Requirements** Run Selection

Analysis Direction:

☐ 2D

☒ 3D

Vertical Component Required?

☒ No

☐ Yes

Fig. 3.16 – Interface gráfica do módulo de requerimentos do utilizador para a análise

3.4.2.1 Resultados

Ao realizar todo o processamento dos *inputs* introduzidos pelo utilizador por meio do botão *Run Selection* (“correr” a seleção), é formado um novo separador chamado *Results* (resultados), o qual apresenta ao utilizador o gráfico com os espectros escalados dos sinais sísmicos, bem como a média aritmética destes sinais, o espectro alvo, o limite individual de cada sinal e o limite da média dos sinais, facilitando a visualização gráfica por parte do utilizador. Abaixo do gráfico ilustrado na Fig. 3.17, existe um botão chamado *Get Time Series*, que, por meio de um *download*, gera um ficheiro *zip*. Este ficheiro contém as *time series* de cada registo selecionado, as quais consistem na história de acelerações de cada registo no tempo, bem como a mesma imagem apresentada para o utilizador no formato *jpg*, e um ficheiro Excel contendo o nome do registo (composto pelo nome do sismo e da estação em que este foi medido), e seus correspondentes fatores de escala e séries temporais (*time step*).

A partir dos dados disponibilizados pela ferramenta por meio da transferência do arquivo *zip* contendo a informação dos sinais sísmicos selecionados, torna-se viável executar as análises dinâmicas pretendidas.

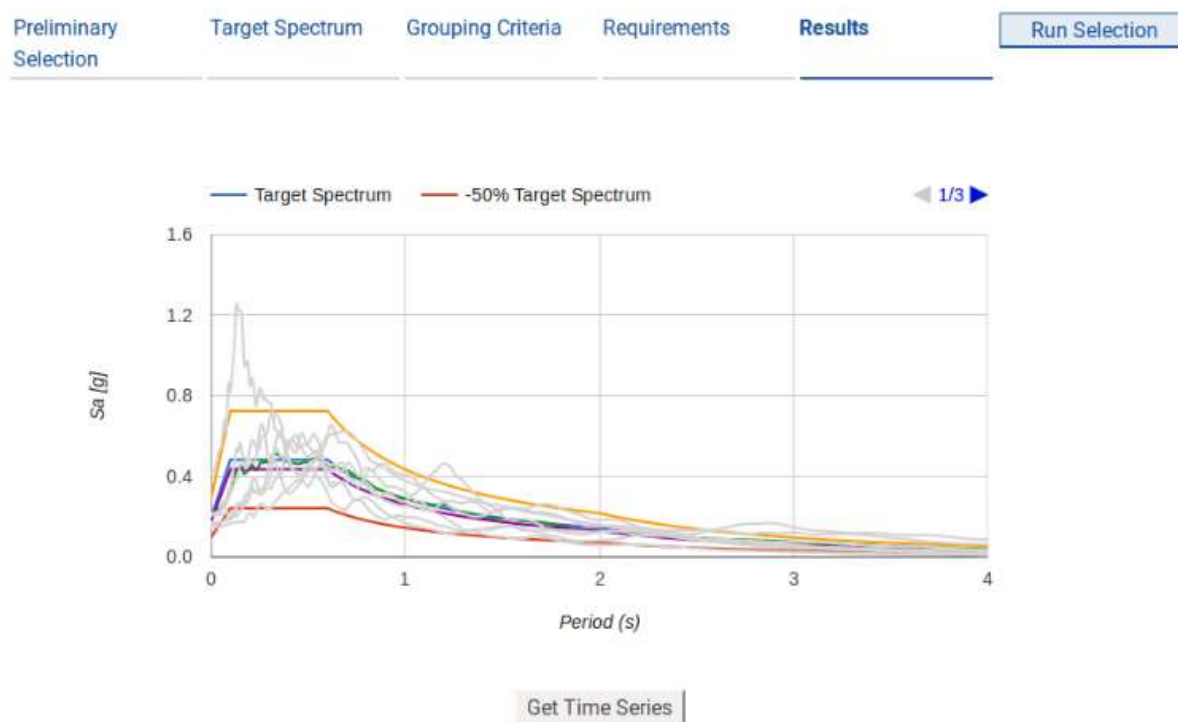


Fig. 3.17 – Interface gráfica dos resultados

4

DOCUMENTAÇÃO DA FERRAMENTA DE SELEÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo versa sobre a documentação utilizada no desenvolvimento da ferramenta SeIEQ, com o objetivo de viabilizar a compreensão do programa e das suas principais funções a fim de possibilitar o seu aperfeiçoamento no futuro. A linguagem utilizada no *backend* foi essencialmente Python, ao passo que o frontend foi desenvolvido em XHTML, CSS e JavaScript, com recurso à *framework* Angular. Serão também apresentados alguns excertos de código para demonstrar o funcionamento de algumas funções.

Como uma linguagem voltada a um paradigma orientado a objetos, o Python tem como foco a criação de objetos, os quais contêm dados e funcionalidades do programa e constituem uma instância de uma classe, ou seja, são a representação de uma classe. Uma classe associa dados (atributos) e operações (métodos) numa só estrutura.

O backend do programa SeIEQ está estruturado em cinco classes, as quais interagem entre si para possibilitar o funcionamento do código. São elas: i) Database, ii) Populate, iii) Spectrum, iv) NGA DatabaseWrapper, v) Selection, sendo esta última a classe central do programa.

4.2 CLASSE DATABASE

De modo a correlacionar o modelo de base de dados anteriormente explicado com o código desenvolvido em Python, foi utilizada uma biblioteca de Python designada por SQLAlchemy, concebida para possibilitar um acesso de maneira eficiente à base de dados e que funciona como um mapeamento objeto-relacional (na terminologia inglesa conhecido como ORM, *object-relational mapping*). O ORM é uma forma de criar uma camada de permuta de dados entre uma base de dados relacional e objetos, pois de um lado existem as tabelas, os atributos e suas relações, e do outro, os objetos de uma linguagem orientada a objetos (OO). De acordo com a abstração do SQLAlchemy, cada entidade do modelo de entidade-relação torna-se numa classe no modelo OO, assim como cada atributo de uma entidade é representado como instância da classe correspondente. As operações realizadas sobre os objetos são traduzidas em SQL (*Structured Query Language* – Linguagem de Consulta Estruturada) e transmitidas para a base de dados por meio do ORM. SQL uma é a linguagem padrão universal para manipular bases de dados relacionais através dos sistemas de gestão de base de dados.

Para implementar o modelo desenvolvido de base de dados a uma base de dados real, foi necessário primeiramente estabelecer uma conexão entre o banco de dados e o SQLAlchemy, por meio de um objeto chamado *engine*.

Excerto de código 1: Criação de uma conexão à base de dados

```
1. from sqlalchemy import create_engine
2. engine = create_engine('postgresql://postgres@localhost:5432/seleq?')
```

Em seguida, no que se refere à criação da base de dados, é necessário de criar as tabelas que serão utilizadas na base de dados: Earthquake, Station, Accelerogram e Record. Os atributos, que são objetos do tipo Column, são usados para definir os campos da tabela. No momento da criação destes atributos, é preciso identificar qual o tipo de dado que vai ocupar aquele campo (integer, float, string, tuple, json). No excerto exemplificativo subsequente, apresenta-se a criação da tabela Accelerogram, contudo ainda sem registos, ou seja, uma tabela vazia. Deste modo esta classe permite apenas a criação de uma estrutura de base de dados, caso esta ainda não exista.

Excerto de código 2: Exemplo de criação de tabelas

```
1. class Accelerogram(Base):
2.     _tablename_ = 'accelerogram'
3.
4.     id = Column(Integer, primary_key=True)
5.     id_earthquake = Column(Integer, ForeignKey('earthquake.id'))
6.     id_station = Column(Integer, ForeignKey('station.id'))
7.     distance_campbell = Column(Float)
8.     distance_closest = Column(Float)
9.     distance_epi = Column(Float)
10.    distance_hyp = Column(Float)
11.    distance_jb = Column(Float)
12.    PGA_hor_geomean = Column(Float)
13.    PGV_hor_geomean = Column(Float)
14.    PGD_hor_geomean = Column(Float)
15.    sa_geomean = Column(JSON)
16.    sv_geomean = Column(JSON)
17.    sd_geomean = Column(JSON)
```

4.3 CLASSE POPULATE

O objetivo principal da classe *Populate* é popular a base de dados, ou seja, preencher todas as colunas de acordo com a informação proveniente do PEER NGA. Para tal fim, foram criados tantos arquivos CSV (*comma-separated values*) quanto o número de tabelas definidas pelo modelo relacional, ou seja, quatro. Estes ficheiros CSV são compostos pelos registos dos atributos seleccionados no modelo de base

de dados anteriormente discutido. Tais atributos estão explicitados de forma gráfica no diagrama de entidade-relação (subsecção 3.2.3.4), e seus registos provêm da base de dados PEER NGA.

De forma a transferir as informações dos ficheiros CSV para objetos em Python, foi utilizada uma biblioteca de Python designada Pandas (*Python Data Analysis Library*), a qual permite, a partir de ficheiros CSV, criar objetos Python com linhas e colunas designados por *data frames*, que possuem uma estrutura semelhante a uma tabela, em que cada linha corresponde a um registo (linha) da tabela e cada coluna corresponde aos atributos (campos) a serem armazenados para cada registo da tabela. Assim sendo, para a criação de *data frames* a partir de ficheiros CSV, é utilizada a função *read_csv*, que tem como argumento a devida localização do ficheiro CSV, conforme é apresentado no excerto exemplificativo de código a seguir.

Excerto de código 3: Leitura de ficheiros CSV e criação de *data frames*

```
1. station_df = pandas.read_csv('/home/Documents/DB/Station_data.csv')
```

Depois de guardados os ficheiros CSV em *data frames*, o desafio passa a ser transferir os registos dos objetos *data frames* para a base de dados. A biblioteca SQLAlchemy possui uma classe chamada Session, que permite estabelecer e manter a comunicação entre o código Python e a base de dados. Esta classe permite, por exemplo, adicionar, atualizar ou apagar registos. No excerto de código seguinte é mostrado o preenchimento linha a linha da classe Station na base de dados, utilizando um *for-loop* que percorre todos os registos existentes no *data frame* referente à classe Estação (Station) para adicioná-los gradualmente à base de dados. A função *add()* desempenha a função de adicionar os registos na base de dados, e a função *commit()* tem por objetivo encerrar a transação e salvar todas as alterações realizadas nesta transação.

Excerto de código 4: Preenchimento da base de dados

```
1. session = Session()
2. for i in range(station_df.shape[0]):
3.     station = Station(
4.         station_name = station_df.at[i, 'station_name'],
5.         vs30 = station_df.at[i, 'vs30'],
6.         latit = station_df.at[i, 'latit'],
7.         longit = station_df.at[i, 'longit']
8.     )
9.     session.add(station)
10.    session.commit()
```

4.4 CLASSE SPECTRUM

Esta classe é responsável pela definição do espectro alvo segundo o Eurocódigo 8 [1], enquanto único regulamento até então implementado no desenvolvimento desta ferramenta. No entanto, a classe encontra-se preparada para a implementação de novos códigos para definição do espectro alvo, uma vez que, para cada um destes códigos, haverá uma subclasse que é herdeira da classe Spectrum. Neste caso,

existem, até ao momento, as subclasses EC8Spectrum, ASCESpectrum, UserDefinedSpectrum, estando estas duas últimas ainda vazias.

Para a realização dos cálculos relativos ao Eurocódigo 8 [1] que definem as ordenadas espectrais segundo os parâmetros necessários para a determinação do espectro alvo, cujas equações estão definidas na Eq. (2.3, foi concebido o método *ec8_spectra*, que é executado a partir da subclasse EC8Spectrum.

4.4.1 MÉTODO EC8_SPECTRA

Este método começa por definir duas listas vazias, uma referente ao período e outra às acelerações espectrais. De seguida são calculadas as acelerações espectrais segundo o Eurocódigo 8, por meio das equações definidas na Eq. (2.3, para vários períodos que estão separados de 0,01 segundos, começando em 0 até 4 segundos. Deste modo, guardam-se todos os valores dos períodos e das acelerações espectrais nos elementos do tipo lista, para posteriormente tornar possível a formação do gráfico do espectro alvo.

Excerto de código 5: Definição do espectro alvo de acordo com o EC8 [1]

```
1.      def ec8_spectra(ag, S, TB, TC, TD, eta, q):
2.          period = []
3.          sp = []
4.          for t in np.arange(0, TB+0.01, 0.01):
5.              value = ag*S*(1+t/TB*(eta*2.5-1))
6.              period.append(t)
7.              sp.append(value)
8.          for t in np.arange(TB, TC+0.01, 0.01):
9.              value = ag*S*eta*2.5
10.             period.append(t)
11.             sp.append(value)
12.          for t in np.arange(TC, TD+0.01, 0.01):
13.              value = ag*S*eta*2.5*(TC/t)
14.              period.append(t)
15.              sp.append(value)
16.          for t in np.arange(TD, 4.01, 0.01):
17.              value = ag*S*eta*2.5*(TC*TD/t**2)
18.              period.append(t)
19.              sp.append(value)
20.          return period, sp
```

4.5 CLASSE NGADATABASEWRAPPER

Os métodos desta classe estão associados aos critérios de seleção preliminar, correspondentes aos valores mínimos e máximos dos campos magnitude, distância epicentral, VS_{30} e aceleração de pico do solo (PGA). Para tal é necessário efetuar uma consulta à base de dados, retornando assim os valores dos códigos de identificação (*ids*) correspondentes aos registos elegíveis para posterior seleção de sinais sísmicos.

4.5.1 MÉTODO SET_FILTERS

Caso o utilizador julgue necessário considerar filtros aos campos presentes no separador correspondente à pré-seleção, dado que não possuem carácter obrigatório, é necessário realizar uma consulta à base de dados, habitualmente designada por *query*. Para tal recorre-se à classe *Session*, na qual é estabelecida uma ligação entre o código e a base de dados. Ao utilizar a função *session.query*, o ORM traduz a operação para SQL, que é uma linguagem padrão de gerenciamento de dados que interage com as principais bases de dados relacionais, e transmite tal operação à base de dados, possibilitando a consulta para a consideração de filtros. Este método devolve a operação que deve ser realizada em SQL, sendo do tipo objeto *Query*.

4.5.2 MÉTODO GET_RECORDS

Este método pesquisa os *ids* correspondentes aos registos sísmicos pré-selecionados. Note-se que, para retornar os *ids* adequados, é necessário considerar a direção da análise pretendida pelo utilizador. Caso o utilizador pretenda uma análise unidirecional (2D), é preciso retornar *ids* da tabela *Recorde*, ao passo que, se a análise pretendida for bidirecional (3D), são retornados os *ids* correspondentes à tabela *Acelerograma*. Este método, além de devolver os *ids* referentes à tabela *Recorde* ou *Acelerograma*, também retoma os *ids* referentes aos sismos e às acelerações espectrais. Salienta-se que, no caso de uma análise bidirecional, as acelerações espectrais correspondem à média geométrica das componentes horizontais e ortogonais de aceleração espectral.

Excerto de código 6: Exemplo de filtragem de dados

```

1.         if bidirectional == False:
2.             records = (
3.                 self.session
4.                     .query(Earthquake.id, Record.id, Record.sa)
5.                     .join(Earthquake.accelerogram)
6.                     .join(Acelerograma.station)
7.                     .join(Acelerograma.record)
8.             )
9.
10.        if filters.get('minmag'):
11.            records =records.filter
12.                (Earthquake.magnitude >= filters.get('minmag'))
13.        if filters.get('maxmag'):
14.            records =records.filter
15.                (Earthquake.magnitude <= filters.get('maxmag'))

```

4.6 CLASSE SELECTION

A classe *Selection* é a classe principal do programa, já que une a informação de todos os parâmetros de entrada no programa e, a partir destes, executa o código responsável pela seleção e escalamento de sinais sísmicos, exibindo posteriormente os resultados pretendidos. Esta secção subdivide-se em três partes: i) processamento dos dados para possibilitar a seleção de sinais sísmicos, ii) realização da seleção por meio da execução do método *run_selection* e do algoritmo de otimização, iii) apresentação de resultados.

4.6.1 PROCESSAMENTO DE DADOS PARA SELEÇÃO

4.6.1.1 Método `__init__`

O método `__init__`, ou também conhecido por construtor, é um método chamado quando uma nova instância do objeto é criada, ou seja, quando ocorrer a criação de um objeto da presente classe, os dados fornecidos são atribuídos automaticamente a este objeto. Este método recebe como argumentos todos os parâmetros fornecidos pelo utilizador (*inputs*).

4.6.1.2 Método `_set_filters`

Este método é responsável por executar o método `set_filters` (Ver 4.6.1.2) da Classe `NGADatabaseWrapper`, o qual faz um *query* à base de dados visando uma pré-seleção. Este método tem como argumentos a direção de análise escolhida pelo utilizador e os parâmetros de pré-seleção: valores mínimos e máximos de magnitude, distância epicentral, VS_{30} e PGA.

4.6.1.3 Método `set_target_spectrum`

De acordo com o tipo de regulamento no qual o utilizador pretenda basear-se para a definição do espectro alvo, este método identifica a subclasse da classe `Spectrum` correspondente ao código regulamentar indicado. Refira-se que, até ao presente momento, só é possível a definição do espectro alvo de acordo com o EC8. Contudo o método encontra-se preparado para a implementação de novos códigos sísmicos. Desta forma, este método cria um objeto da subclasse `EC8Spectrum`, que recebe os parâmetros necessários para a definição do espectro alvo, estabelecidos pelo utilizador, e retorna duas listas: uma com valores de períodos de 0 a 4 segundos, com um intervalo de 0.01 segundos entre estes valores, e outra com os valores das acelerações do espectro alvo, correspondentes a cada período presente na primeira lista devolvida.

4.6.1.4 Método `get_pre_selection`

Este método retorna uma lista com os *ids* referentes aos registos que foram pré-selecionados de acordo com o método `get_records` (Ver 4.5.2).

4.6.2 EXECUÇÃO DO CÓDIGO DE SELEÇÃO E ESCALAMENTO DE SINAIS SÍSMICOS

4.6.2.1 Método `run_selection`

Este método implementa o processo de seleção ao executar o algoritmo de otimização, o qual retorna os *ids* selecionados, cuja quantidade o utilizador define como parâmetro na interface gráfica. De início, a atual função cria três ficheiros *mat*, extensão associada a ficheiros MATLAB, com a finalidade de servirem como dados de entrada para o algoritmo de otimização, programado em MATLAB. Os três ficheiros são correspondentes aos *ids* dos registos pré-selecionados, às acelerações espectrais referentes a cada registo pré-selecionado, e aos critérios de agrupamento de sinais, os quais são definidos pelo utilizador da ferramenta.

Excerto de código 7: Criação de um ficheiro *mat*

```
1.         scipy.io.savemat('criteria.mat', mdict={'criteria': criteria})
```

Após a criação dos ficheiros *mat*, o código envia um pedido com estes ficheiros para o algoritmo de otimização, que se encontra num servidor local, o qual retorna um dicionário com valores do *id* do registo selecionado e correspondente fator de escala. Um exemplo de dicionário devolvido pelo algoritmo de otimização com o total de sete registos tem o seguinte formato: [{ "id":745, "sf":1.4 }, { "id":2594, "sf":2.0 }, { "id":924, "sf":1.6 }, { "id":1037, "sf":2.2 }, { "id":1056, "sf":2.3 }, { "id":1097, "sf":1.0 }, { "id":1124, "sf":1.7 }].

De seguida, o método procede com a leitura dos resultados devolvidos pelo algoritmo e a busca pelos espectros de aceleração referentes a cada *id*. De salientar que os *ids* dos registos selecionados referem-se aos *ids* da tabela Acelerograma caso a análise seja tridimensional, e aos *ids* da tabela Recorde caso a análise seja bidimensional. As acelerações espectrais são guardadas numa lista. Este método devolve os *ids* e os fatores de escalas correspondentes aos sinais selecionados.

4.6.3 RESULTADOS

4.6.3.1 Método `get_results_summary`

Este método retorna um tuplo, que é uma lista de valores separados por vírgula. Este tuplo refere-se ao *id* do registo selecionado e ao fator de escala correspondente a este sinal sísmico. Tem-se como exemplo de uma lista de tuplos: [(745, 1.4), (2594, 2.0), (924, 1.6), (1037, 2.2), (1056, 2.3), (1097, 1.0), (1124, 1.7)].

4.6.3.2 Método `get_results_detailed`

O presente método, inicialmente, gera uma lista apenas com os *ids* retornados pelo algoritmo de otimização. De seguida, procede com a consulta (*query*) na base de dados de mais detalhes sobre os registos selecionados, tais como o nome do sismo e o nome da estação onde o abalo sísmico foi registado.

Excerto de código 8: Exemplo de *query* à base de dados para informações do nome do sismo e da estação

```
1.         results_detailed = []
2.         eq_id_list = []
3.         for i in range(len(self.list_of_dict_returned)):
4.             eq_id_list.append(self.list_of_dict_returned[i]["id"])
5.
6.         if self.general_information["bidirectional"] == False:
7.             for i, dict_returned in enumerate(self.list_of_dict_returned):
8.                 accel_id = self._database.session.query(Record).filter_by(id =
9.                 eq_id_list[i]).first().id_accelerogram
10.                eq_id = self._database.session.query(Accelerogram).filter_by(id =
11.                accel_id).first().id_earthquake
```

```

12.         station_id =
13.         self._database.session.query(Accelerogram).filter_by(id =
14.         accel_id).first().id_station
15.         eq_name=self._database.session.query(Earthquake).filter_by(id=
16.         eq_id).first().eq_name
17.         station_name=self._database.session.query(Station).filter_by(id=
18.         station_id).first().station_name
19.         dict_returned["eq_name"]=eq_name
20.         dict_returned["station_name"]=station_name
21.         dict_returned["rec_id"] = dict_returned.pop("id")
22.         results_detailed.append(dict_returned)

```

Este método devolve uma lista de dicionários do tipo: {'station_name': "Kardista", 'accel_id': 1124, 'eq_name': "Kozani. Greece-01", 'sf': 1.7}. Note-se que foram escolhidos os nomes do sismo e da estação em que este foi gravado, pelo fato de ser criado, posteriormente, um ficheiro *txt* com as *time series*, cuja denominação contém tais nomes, o que será explicado em 4.6.3.4.

4.6.3.3 Método plot_spectra

Este método é responsável por gerar o gráfico com os espectros de acelerações selecionados, bem como com a média destes espectros e os limites tanto individuais como do grupo espectral. Este gráfico será apresentado para o utilizador após processamento do pedido HTTP, que acontece quando se clica no botão “Run Selection”.

De início o método escala os espectros selecionados, levando em consideração os fatores de escala recebidos pelo algoritmo de otimização, os quais correspondem a um determinado registo sísmico. Refira-se que, no caso de uma análise tridimensional, os espectros selecionados dizem respeito à média geométrica das componentes horizontais de aceleração espectral. De seguida é gerado o gráfico da média das acelerações espectrais selecionadas, visando possibilitar uma comparação com o espectro alvo, pois estudos realizados sugerem que os resultados podem ser mais precisos desde que a média das acelerações espectrais seja superior a 90% do espectro alvo (na guia correspondente aos critérios de agrupamento de sinais, *Grouping Criteria*, este valor refere-se ao *Lower Mean*), impondo um valor limite superior, designado por *Upper Mean*, que não convém ser demasiado afastado do espectro alvo. Segundo o EC8, o valor *Lower Mean* é rigorosamente 90% do espectro regulamentar (ver 2.3.3.1), ao passo que o valor *Upper Mean* não é considerado um valor fixo na ferramenta SeIEQ, sendo um *input* dado pelo utilizador, ao qual é dada a possibilidade de escolher uma faixa aceitável onde a média dos espectros se enquadre de forma adequada.

Excerto de código 9: Escalamento das acelerações espectrais selecionadas e cálculo de sua média

```

1.         scaled_spect_coordinates = []
2.         sum_scaled_spect_accel = np.zeros(1001)
3.         for i, spec_accel_json in enumerate(self.spec_accel_list):
4.             spect_accel_array = spec_accel_json["0.05"]

```

```

5.         scaled_spect_accel = np.array([k *
6.     self.list_of_dict_returned[i]["sf"] for k in spect_accel_array])
7.         plt.plot(period, scaled_spect_accel, color = 'gray')
8.         scaled_spect_points = tuple(map(tuple,np.array((period,
9.     scaled_spect_accel)).T))
10.        scaled_spect_coordinates.append(scaled_spect_points)
11.        sum_scaled_spect_accel = np.array(sum_scaled_spect_accel) +
12.    np.array(scaled_spect_accel)
13.        average_scaled_spect_accel = (sum_scaled_spect_accel /
14.    len(self.list_of_dict_returned)).tolist()
15.        plt.plot(period, average_scaled_spect_accel, color = 'blue' )

```

De seguida o método continua a gerar os gráficos correspondentes ao espectro alvo e aos limites fornecidos pelo utilizador no separador “*Grouping Criteria*”, tais como *Lower Mean*, *Upper Mean* e *Individual Limit*, sendo este último correspondente ao limite individual de cada sinal sísmico, o qual é definido a título de verificação de compatibilidade entre cada espectro individual gerado por um sinal sísmico e o espectro alvo. Por fim é gerado um ficheiro *jpg* com uma imagem que contém todos os gráficos neste método explorados, conforme se ilustra na Fig. 4.1.

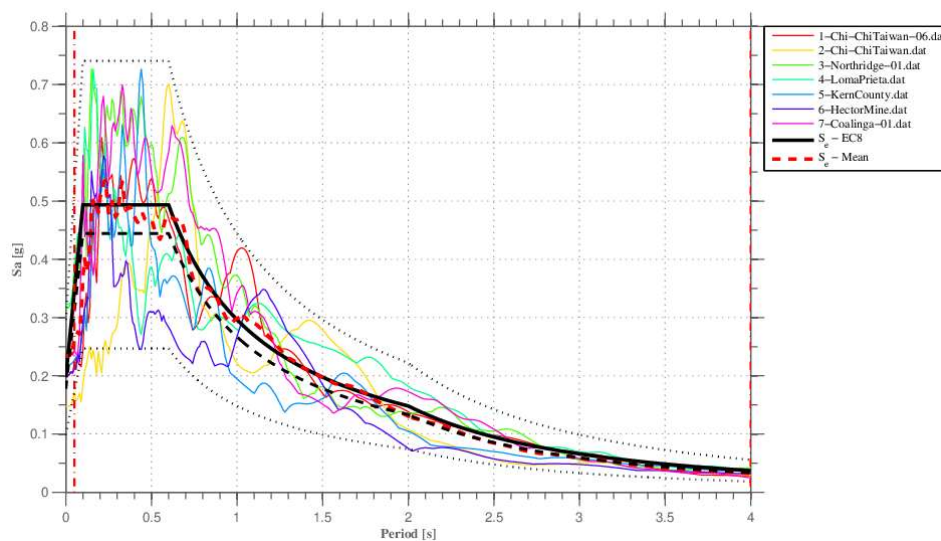


Fig. 4.1 – Exemplo de imagem gerada pelo método *plot_spectra*

4.6.3.4 Método *get_time_series*

O último método da classe *Selection* corresponde ao método *get_time_series*, o qual é responsável por gerar arquivos *zip* contendo histórias de aceleração no tempo (*time series*), que são as componentes de acelerações horizontais registadas no domínio do tempo, podendo também serem acrescentadas as componentes verticais caso o utilizador pretenda. Este ficheiro é acedido por meio do *download* realizado ao pressionar o botão “*Get Time Series*” no separador “*Results*”. Este ficheiro, cujo nome é gerado de maneira aleatória, é composto por, além dos ficheiros de texto referentes às *time series*, uma

imagem *jpg* gerada a partir do método *plot_spectra* (Ver subdivisão 4.6.3.3), e um ficheiro Excel (Fig. 4.2). Este último ficheiro contém o nome do registo, composto pelo nome do sismo e pelo nome da estação em que este foi medido, separados por um subtraço, bem como a amostra temporal (*time step*) de cada registo e o seu correspondente fator de escala, para cada componente da aceleração.

	A	B	C
1	Record	Time Step (sec)	Scaling Factor
2	1-'Loma Prieta'_Bear Valley #14, Upper Butts Rn'_X.txt	0.005	1.4
3	1-'Loma Prieta'_Bear Valley #14, Upper Butts Rn'_Y.txt	0.005	1.4
4	2-'Chi-Chi. Taiwan-03'_TCU034'_X.txt	0.005	2
5	2-'Chi-Chi. Taiwan-03'_TCU034'_Y.txt	0.005	2
6	3-'Big Bear-01'_Puerta La Cruz'_X.txt	0.02	1.6
7	3-'Big Bear-01'_Puerta La Cruz'_Y.txt	0.02	1.6
8	4-'Northridge-01'_Mojave - Oak Creek Canyon'_X.txt	0.02	2.2
9	4-'Northridge-01'_Mojave - Oak Creek Canyon'_Y.txt	0.02	2.2
10	5-'Northridge-01'_Phelan - Wilson Ranch'_X.txt	0.01	2.3
11	5-'Northridge-01'_Phelan - Wilson Ranch'_Y.txt	0.01	2.3
12	6-'Northridge-01'_Wrightwood - Nielson Ranch'_X.txt	0.01	1
13	6-'Northridge-01'_Wrightwood - Nielson Ranch'_Y.txt	0.01	1
14	7-'Kozani. Greece-01'_Kardista'_X.txt	0.005	1.7
15	7-'Kozani. Greece-01'_Kardista'_Y.txt	0.005	1.7

Fig. 4.2 – Ficheiro de Excel gerado para o utilizador

5

APLICAÇÃO DA FERRAMENTA A UM CASO DE ESTUDO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises sísmicas de um pórtico metálico simples e bidimensional, realizadas com recurso ao *software* Robot Structural Analysis 2019 (ROBOT). Estas análises consistem em dois tipos: i) análise dinâmica linear (*linear dynamic analysis*, LDA) ou análise da história no tempo (*time history analysis*, THA) e ii) análise modal por espectro de resposta (em inglês, *modal response spectrum analysis* ou MRSA). O primeiro tipo está relacionado com a seleção de sinais sísmicos, sendo esta fornecida pela ferramenta desenvolvida no âmbito desta dissertação, ao passo que o segundo tem em conta a definição do espectro de acelerações segundo o Eurocódigo 8. Será feito um estudo comparativo entre estes dois tipos de análises.

5.2 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo apresentado consiste num pórtico metálico com três vãos e com cinco pisos, com uma configuração regular em planta e em altura. A estrutura do pórtico de 5 pisos é ilustrada pelo corte e pela planta apresentados na Fig. 5.1. O pórtico estudado está representado a tracejado na planta, sendo constituído por vãos de 6 metros com cargas lineares distribuídas, tendo um primeiro piso com 4.5m de pé-direito e os restantes com 3.5m de altura.

O edifício foi projetado de acordo com o Eurocódigo 3 e segundo a Parte 1 do Eurocódigo 8. Refira-se que a estrutura em estudo já existia previamente. No dimensionamento sísmico foi considerado um nível de ductilidade médio (DCM) tendo sido adotado um valor do coeficiente de comportamento igual a 4.0. O coeficiente de sensibilidade de deslocamento relativo entre pisos, θ , foi limitado ao intervalo $0.2 < \theta < 0.3$. Este coeficiente é considerado com a finalidade de verificar a necessidade de consideração dos efeitos de segunda ordem no processo de análise e de projeto da estrutura. Foram utilizados perfis da série IPE para as vigas e da série HEB para os pilares, como representado no Quadro 5.1. No que concerne às propriedades dos materiais, o aço é considerado de classe S275, tanto para vigas como pilares, com uma tensão de cedência nominal de 275 MPa.

A ação sísmica é quantificada para um solo do tipo B localizado em Lisboa (Zona Sísmica: 1.3), considerando um amortecimento de 5% e uma classe de importância II ($\gamma_1 = 1.$). O valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do Tipo A, a_{gR} , é de $1,50 \text{ m/s}^2$. Tal ação sísmica é definida pelo espectro elástico de resposta representado na Fig. 5.2.

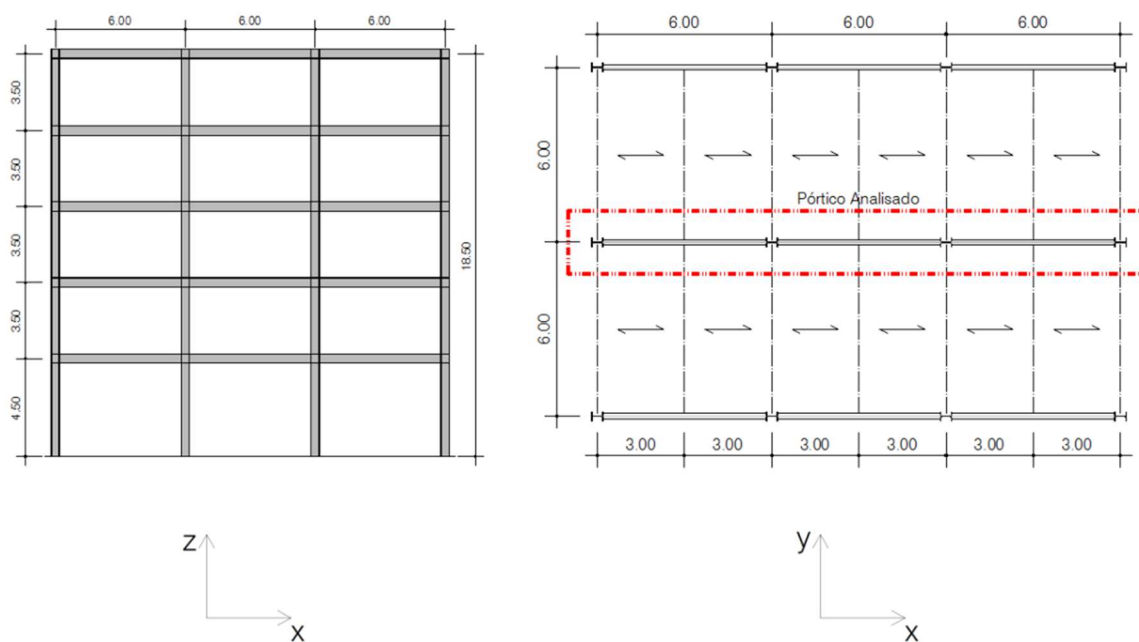


Fig. 5.1 - Representação em corte e em planta do edifício, dimensões dos elementos estruturais

Quadro 5.1 – Características dos elementos estruturais do edifício em estudo

Piso	Pilares	Vigas
5	HE280B	IPE300
4	HE280B	IPE300
3	HE280B	IPE300
2	HE300B	IPE330
1	HE300B	IPE330

Espectro segundo o Eurocódigo 8

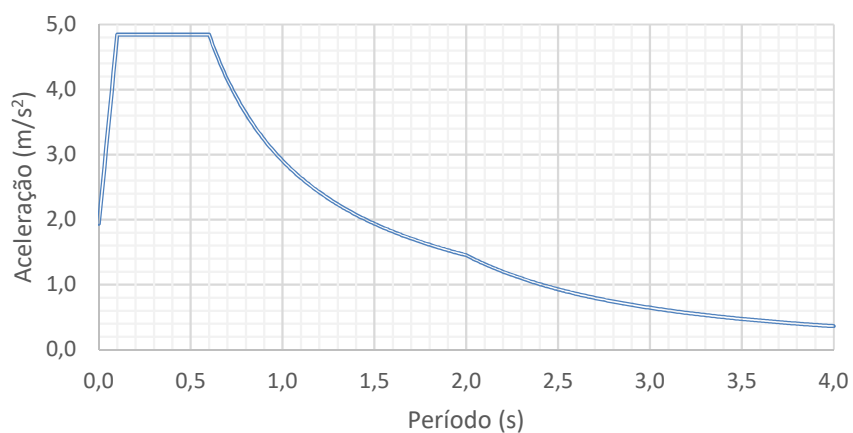


Fig. 5.2 – Espectro do EC8 que caracteriza a zona geográfica do edifício em estudo

Relativamente às cargas a que o pórtico em questão está a ser submetido, são consideradas uma carga permanente superficial (G_k) de 5 kN/m² e uma sobrecarga (Q_k) de 2 kN/m² para todos os pisos, exceto para a cobertura, que possui uma sobrecarga de 1 kN/m². Deste modo, o Quadro 5.2 apresenta os valores das cargas lineares distribuídas F aplicadas a todos os vãos do pórtico em estudo, como ilustrado na Fig. 5.3.

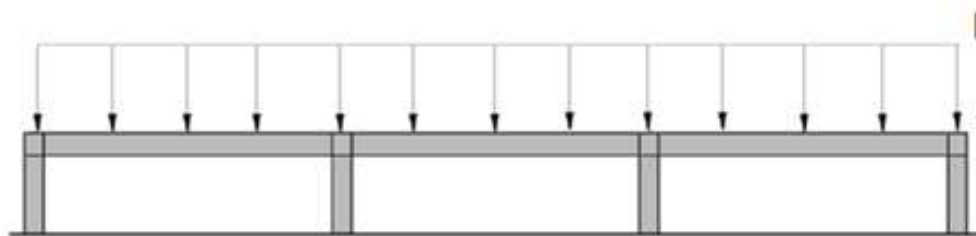


Fig. 5.3 – Distribuição das ações gravíticas num piso do pórtico

Quadro 5.2 – Ações gravíticas atuantes sobre o pórtico

	Carga	F (kN/m)
Piso Tipo	G_k	30.0
	Q_k	12.0
Cobertura	G_k	30.0
	Q_k	6.0

5.3 ANÁLISE MODAL

Esta análise tem como objetivo determinar as propriedades mecânicas do sistema, tais como frequências e modos de vibração. A ilustração abaixo representa os seis primeiros modos de vibração do sistema.

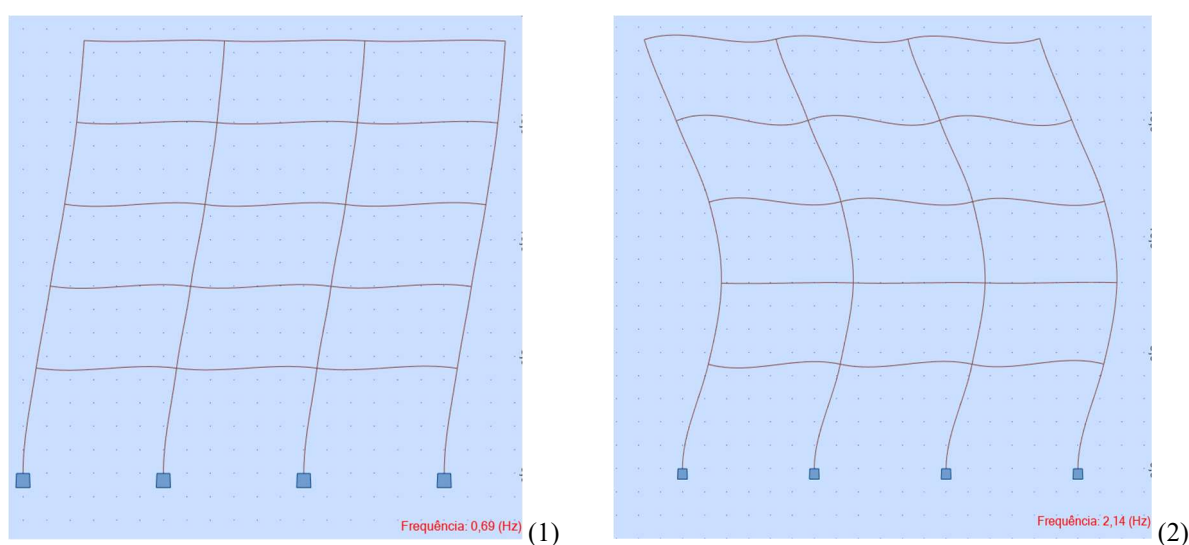


Fig. 5.3 – Modos de vibração do sistema

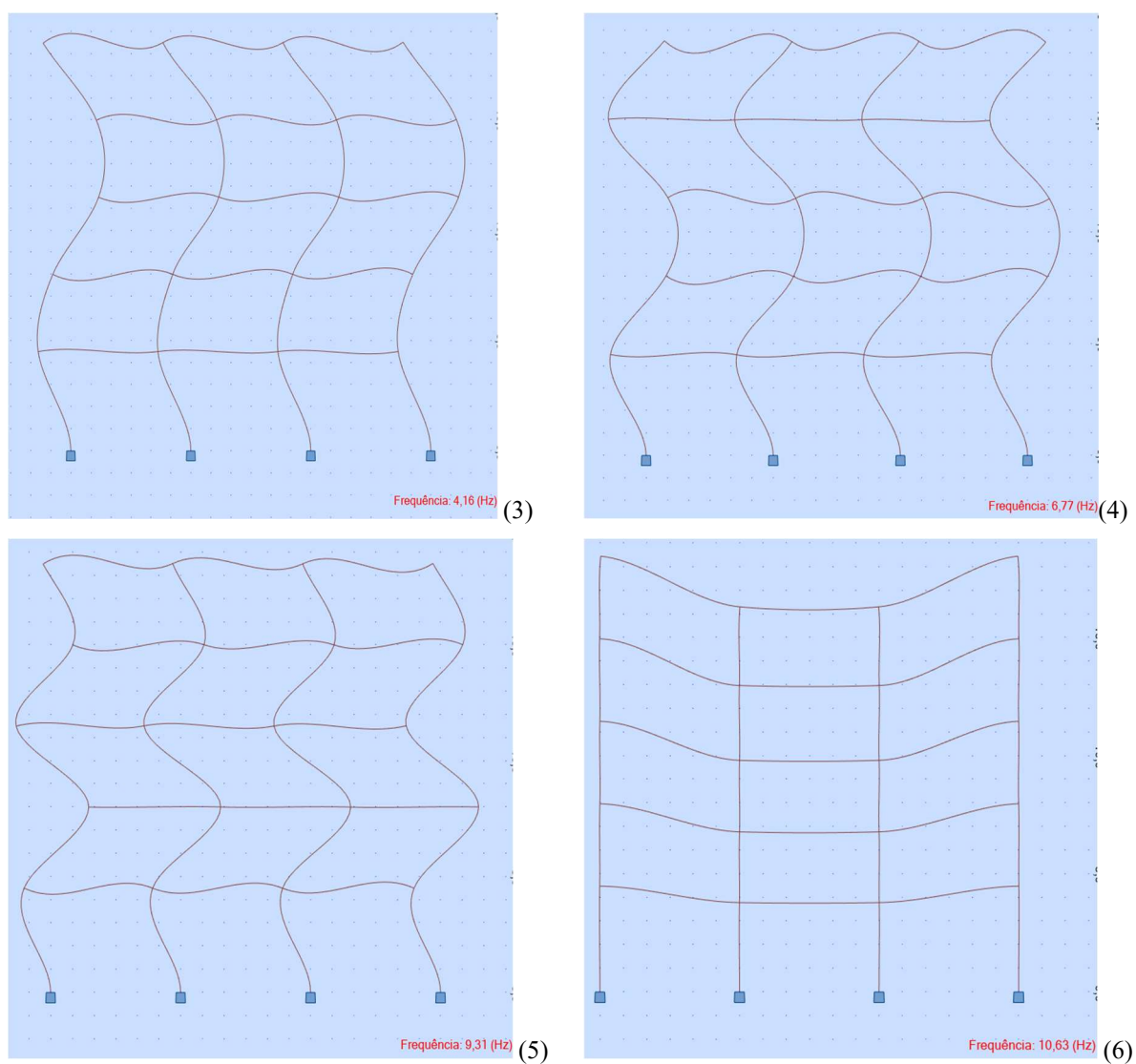


Fig. 5.3 – Modos de vibração do sistema

As frequências e os períodos associados a cada modo de vibração estão apresentadas no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Frequência e período dos modos de vibração

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0.69	1.45
2	2.14	0.47
3	4.16	0.24
4	6.77	0.15
5	9.31	0.11
6	10.63	0.09

5.4 ANÁLISE DA HISTÓRIA NO TEMPO

Segundo o EC8, o movimento sísmico poderá ser representado em termos da variação da aceleração à superfície do terreno em função do tempo e das grandezas associadas (velocidade e deslocamento). A descrição do movimento sísmico pode ser feita utilizando acelerogramas.

De acordo com parâmetros específicos de entrada fornecidos pelo utilizador na interface da ferramenta SelEQ, foram retornadas sete histórias de aceleração no tempo (*time series*), com as correspondentes amostras temporais (*time steps*) e fatores de escala, representados no Quadro 5.4. Do mesmo modo, é também fornecido ao utilizador um gráfico com os espectros já escalados, como ilustrado na Fig. 5.4.

Quadro 5.4 – Output da ferramenta SelEQ, apresentando a amostra temporal e o fator de escala de cada sinal

Sinal	Nome do sismo	Time step	Fator de escala
1	Chi-ChiTaiwan-06	0.005	1.29613
2	Chi-ChiTaiwan	0.004	0.59290
3	Northridge-01	0.01	1.98079
4	LomaPrieta	0.005	0.62641
5	KernCounty	0.01	1.22088
6	HectorMine	0.01	0.75629
7	Coalinga-01	0.01	1.99996

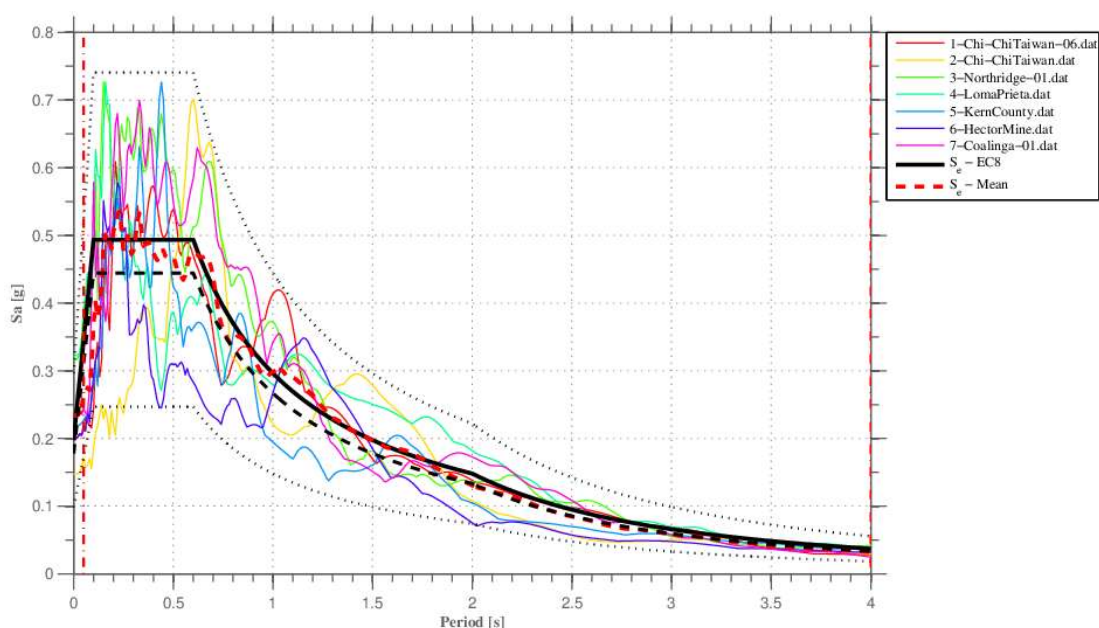


Fig. 5.4 – Output da ferramenta SelEQ, apresentando o gráfico dos espectros escalados

Após a ferramenta devolver ao utilizador as histórias de acelerações no domínio do tempo de cada sinal seleccionado, torna-se possível a análise do histórico de acelerações no tempo, com o apoio do *software* ROBOT, conforme se ilustra na Fig. 5.5.

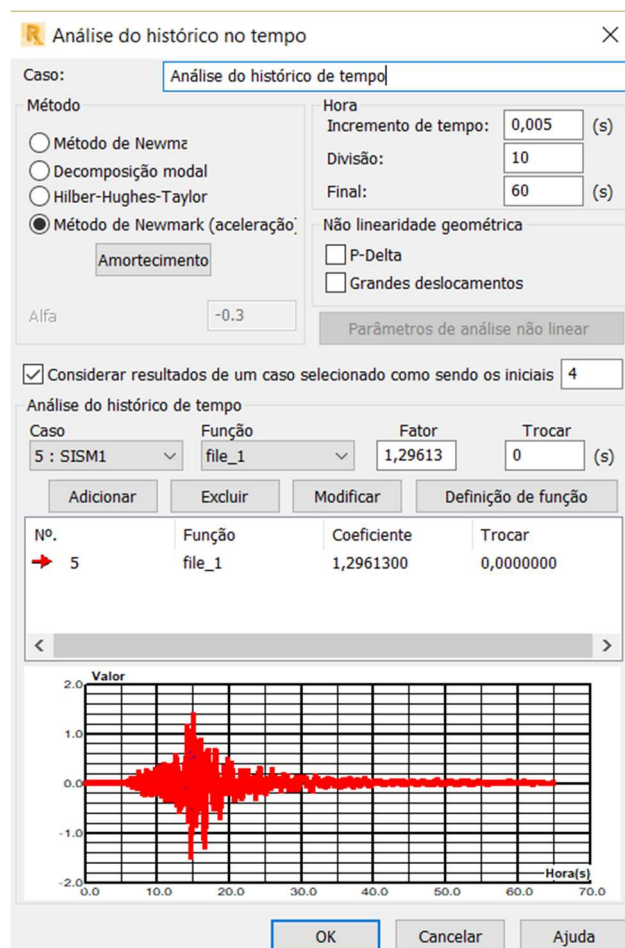


Fig. 5.5 – Análise do histórico no tempo pelo software Robot

O método de integração seleccionado foi o método de Newmark, por ser um dos mais utilizados na análise dinâmica das estruturas, além de ser estável e permitir a utilização de intervalo de tempo maiores, reduzindo o custo computacional. A opção Método de Newmark (aceleração) foi implementada posteriormente no software e é mais versátil pois, além de permitir análises lineares e não lineares no domínio do tempo, suporta excitações cinemáticas nos apoios expressas em termos de velocidades ou acelerações. Esta opção foi seleccionada, uma vez que foram aplicadas acelerações unitárias em cada apoio com a finalidade de impor uma movimentação do solo que será correspondente às acelerações registadas pelos abalos sísmicos seleccionados, conforme se ilustra na Fig. 5.6.

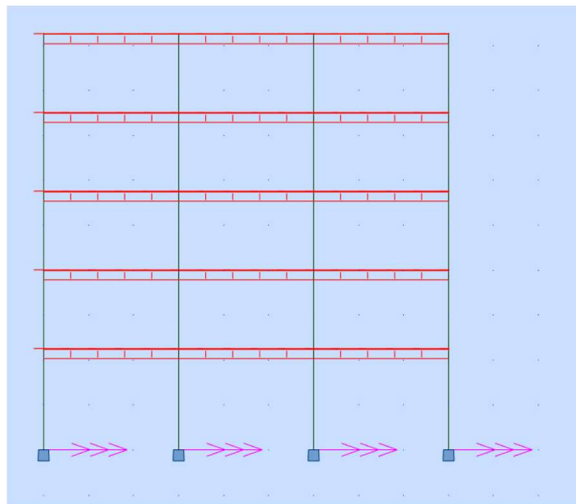


Fig. 5.6 – Acelerações unitárias impostas nos apoios

Para este método de integração direta, é necessário incluir o amortecimento de Rayleigh, cujos parâmetros determinantes são os fatores de proporcionalidade em relação à matriz de massa e de rigidez (α e β respetivamente), os quais são funções da frequência angular e do coeficiente de amortecimento para dois modos devidamente escolhidos. Deste modo, foram calculados os parâmetros de proporcionalidade tendo em consideração as frequências angulares do primeiro e do quarto modos de vibração, com um fator de amortecimento de 5%. A curva do amortecimento de Rayleigh considerada encontra-se representada na Fig. 5.7.

Amortecimento de Rayleigh

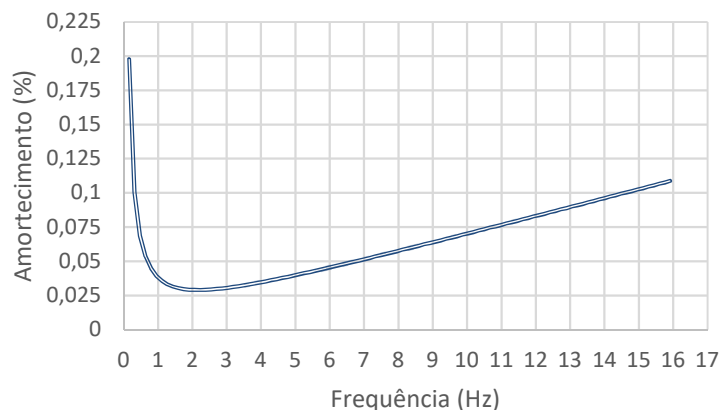


Fig. 5.7 – Amortecimento de Rayleigh

O intervalo de tempo representa o espaço de tempo no qual os resultados são armazenados e pode ser definido como, no mínimo, o *time step* do acelerograma; o campo da divisão representa o número de divisões do intervalo de tempo que definem a frequência de armazenamento dos resultados da análise; o *input* correspondente ao campo final equivale ao valor final do tempo até ao qual a análise é realizada.

A análise do histórico no tempo permite selecionar ficheiros de texto com os registos temporais e suas correspondentes acelerações, assim como permite também a inclusão de um fator de escala para o sismo. É necessário, também, selecionar o caso de carga correspondente à análise: neste caso, foi selecionado o caso de carga que compreende o quadro de acelerações unitárias impostas aos apoios na direção X,

bem como foi pedido para considerar um caso de carga como inicial, sendo este o correspondente à combinação manual de cargas que considera as cargas verticais, ou seja, a soma das parcelas relativas à carga permanente e a 20% da sobrecarga.

5.4.1 RESULTADOS

A resposta da análise pode ser obtida em função de uma história temporal de deslocamentos, velocidades, acelerações ou esforços. Seguem-se alguns exemplos de diagramas resultantes da análise THA.

Deslocamentos - Nível do solo - Sinal 1

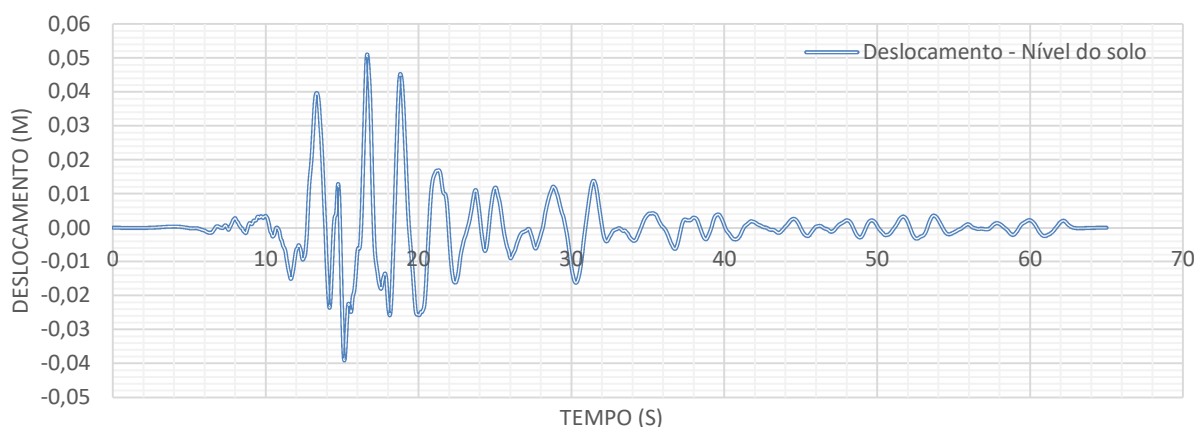


Fig. 5.8 – Deslocamentos de um ponto do solo para o sinal 1

Deslocamentos - Nível do solo - Sinal 2

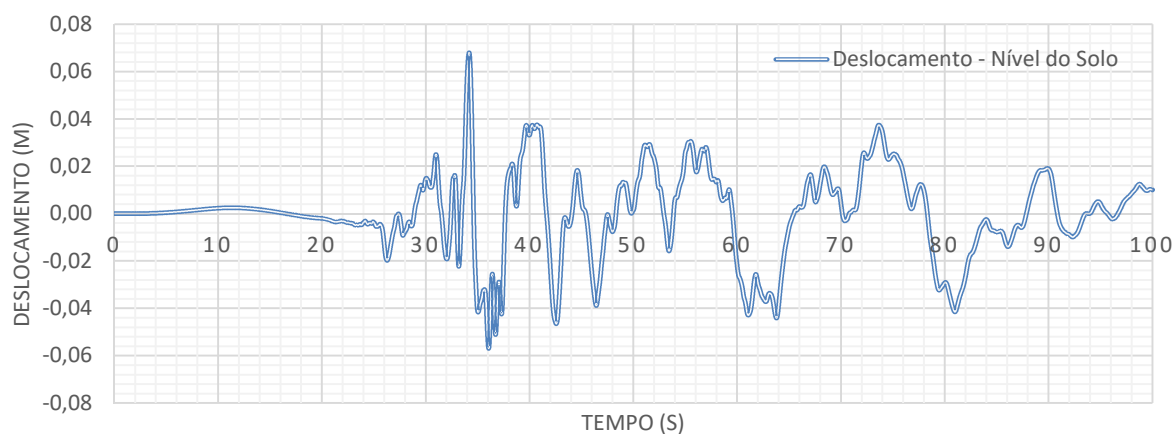


Fig. 5.9 - Deslocamentos de um ponto do solo para o sinal 2

Deslocamentos - Nível do Solo e Cobertura - Sinal 2

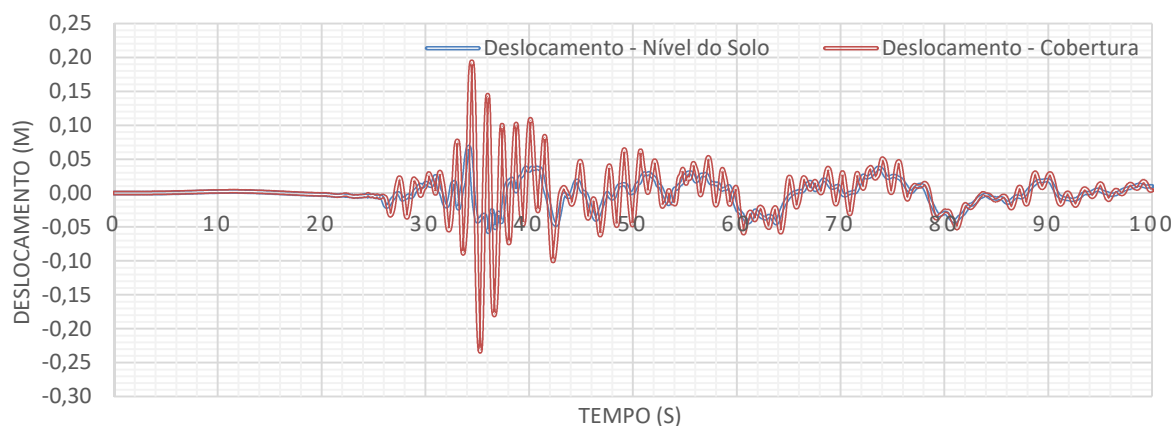


Fig. 5.10 – Deslocamentos de um ponto do solo (verde) e um ponto na cobertura (azul) para o sinal 2

Deslocamentos para cada piso - Sinal 3

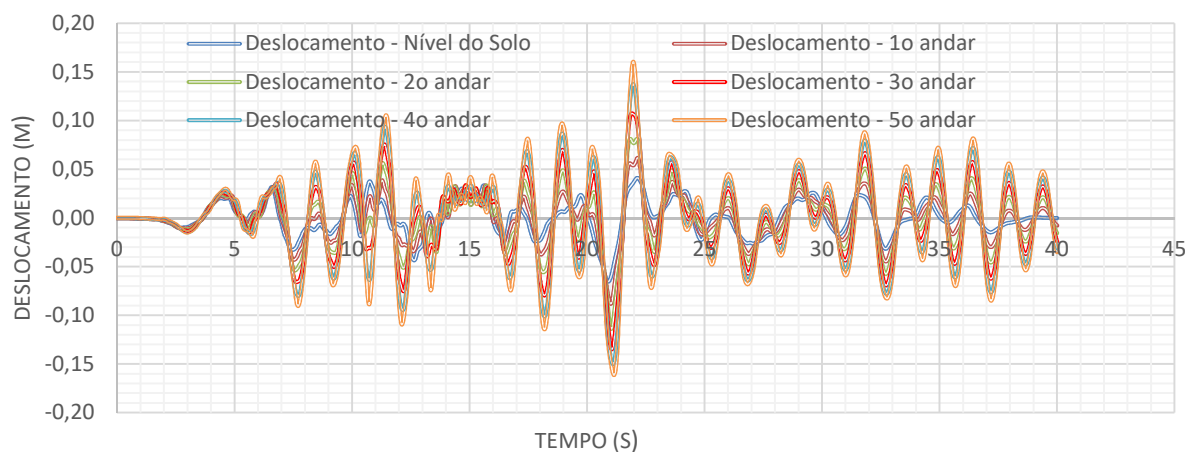


Fig. 5.11 – Deslocamentos de um ponto em cada piso para o sinal 3

Note-se que é possível verificar os efeitos de amplificação dinâmica das grandezas associadas de acordo com o piso em que o ponto em análise se encontra, conforme se mostra na Fig. 5.10 e na Fig. 5.11.

5.5 ANÁLISE MODAL POR ESPECTRO DE RESPOSTA

A análise modal por espectro de resposta mede a contribuição de cada modo natural de vibração e indica a resposta sísmica máxima de uma estrutura essencialmente elástica. Na secção anterior foi apresentada a metodologia para encontrar a resposta de uma estrutura quando solicitada por movimentação na base representativas de uma ação sísmica por meio de uma série de acelerações ao longo do tempo. Numa considerável parte dos casos nos quais é pretendido realizar uma análise sísmica de estruturas com comportamento linear, não se tem como objetivo explorar a evolução da resposta ao longo do tempo,

mas sim calcular os valores extremos máximos desta resposta. Em tais casos manifesta-se mais prático recorrer a uma análise modal por espectro de resposta.

Foi definido um espectro alvo para a zona de Lisboa, o qual foi utilizado para a MRSA (ver Fig. 5.2). Esta análise define os valores máximos da resposta para cada modo e, para o cálculo da resposta global da estrutura, combinam-se os resultados obtidos em cada um dos modos. Existem alguns métodos possíveis de sobreposição modal, entre eles a combinação quadrática completa (CQC) e o método da raiz quadrada da soma dos quadrados (SRSS). Regra geral, a combinação modal correspondente à raiz quadrada da soma dos quadrados apresenta valores satisfatórios desde que as frequências próprias da estrutura não se encontrem muito próximas entre si, já que este método assume que as respostas são independentes e não tem em consideração o efeito de correlação entre as respostas dos vários modos. Esta situação condiz com a realidade do sistema em estudo, o que pode ser verificado no Quadro 5.3, e, por este motivo, será este o método de sobreposição modal considerado para efeitos de comparação de resultados entre as análises supracitadas.

A partir desta análise, é possível aferir que o primeiro modo de vibração é o modo mais condicionante na participação da resposta modal. Isto deve-se ao facto de a estrutura ser simples e não possuir irregularidades em altura. O confronto entre a resposta em termos de deslocamento dos nós 1 a 6, explicitados na Fig. 5.12, para o primeiro modo de vibração e a resposta para a combinação modal SRSS pode ser observada no Quadro 5.5.

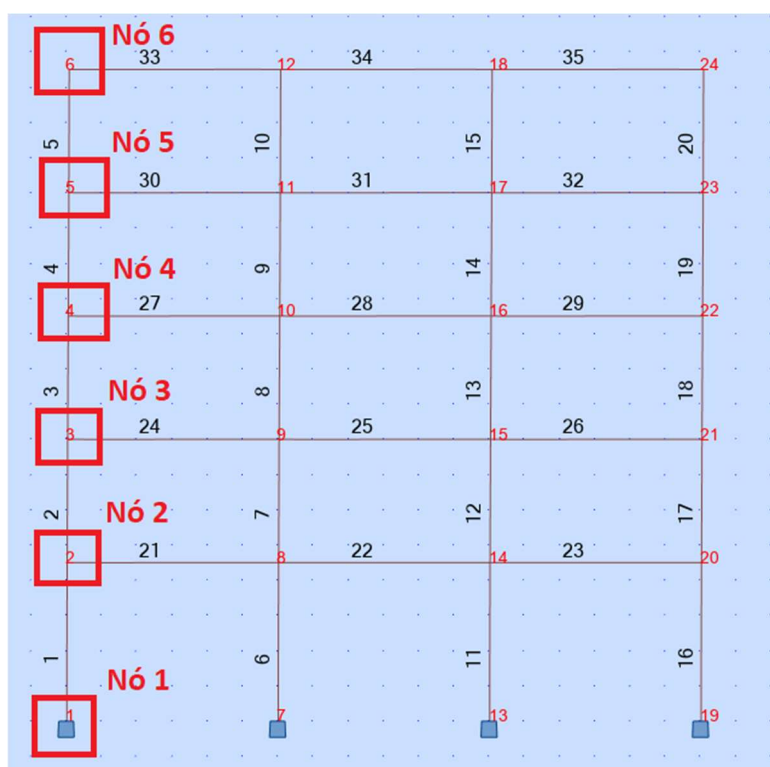


Fig. 5.12 – Identificação de nós

Quadro 5.5 – Respostas em termos de deslocamentos

Nó	1º modo [m]	SRSS [m]
6	0,14005	0,14056
5	0,12284	0,12287
4	0,09546	0,09582
3	0,06243	0,06360
2	0,03007	0,03117
1	0,0000	0,00000

5.6 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE ANÁLISES

5.6.1 DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DOS PISOS

Os valores dos deslocamentos modais máximos de cada piso foram retirados do *software* Robot, bem como os valores correspondentes à combinação SRSS de suas respostas modais. Comparativamente, foram recolhidos do mesmo *software* os valores condizentes ao deslocamento de cada piso para a análise no domínio do tempo para cada um dos sete sinais selecionados, tendo como objetivo o confronto dos valores relativos à média dos deslocamentos de cada sinal com os valores de deslocamentos obtidos na análise modal por espectro de resposta, como pode ser analisado no Quadro 5.6, no qual os valores estão apresentados em percentagem (%). Verifica-se que os valores correspondentes à média do deslocamento horizontal máximo de cada sinal apresentam-se bastante próximos daqueles provenientes da sobreposição modal pelo método da raiz quadrada da soma dos quadrados, sendo, apenas nos 2 últimos andares, a análise THA ligeiramente mais exigente do que a análise MRSA.

Quadro 5.6 - Valores dos deslocamentos horizontais dos pisos [m] para ambas as análises consideradas, em %

Máximo Deslocamento Horizontal	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5
Sinal 1	2.53	5.15	8.25	11.59	13.98
Sinal 2	4.50	9.20	13.71	17.38	19.97
Sinal 3	2.50	4.97	7.37	10.17	12.44
Sinal 4	3.72	7.41	11.58	15.53	18.51
Sinal 5	2.85	5.73	8.05	9.22	9.70
Sinal 6	2.67	5.84	9.58	12.89	15.07
Sinal 7	2.70	5.43	7.73	9.29	10.62
Deslocamento Horizontal Médio	3.07	6.25	9.47	12.30	14.33
Deslocamento Horizontal SRSS	3.12	6.36	9.58	12.29	14.06
Diferença (%)	1.59	1.77	1.20	-0.07	-1.94

5.6.2 DESLOCAMENTOS RELATIVOS ENTRE PISOS

Relativamente à análise *time history* (THA), para cada sinal seleccionado, foi considerado o histórico de deslocamentos de um determinado nó por piso (para visualização dos nós, ver Fig. 5.12) e foi calculado o *drift* entre pisos para cada instante no tempo, o qual corresponde ao deslocamento relativo entre pisos adjacentes normalizado pela altura do piso, visando, posteriormente, seleccionar o valor máximo do *drift* para cada andar. Este procedimento de determinação do *drift* foi realizado igualmente para a análise modal com base no espectro de resposta, com base nos deslocamentos provenientes da sobreposição modal pelo método da raiz quadrada da soma dos quadrados. Deste modo, compara-se o valor médio dos *drifts* máximos de cada sinal com o valor dos *drifts* obtidos na análise espectral. De acordo com o Quadro 5.7, verifica-se que a diferença referente ao *drift* entre o solo e o primeiro piso é relativamente elevado, mas logo em seguida decresce significativamente e, com a evolução em altura do edifício, volta a aumentar progressivamente. Este facto pode ser verificado por meio da divergência entre as linhas do gráfico ilustrado na Fig. 5.13. A distribuição do deslocamento relativo entre pisos ao longo da altura do edifício está representada na Fig. 5.14.

Quadro 5.7 - Valores dos deslocamentos relativos entre pisos [m] para ambas as análises consideradas, em %

Máximo Drift	Drift ₁₂	Drift ₂₃	Drift ₃₄	Drift ₄₅	Drift ₅₆
Sinal 1	0.56	0.79	1.03	1.01	0.69
Sinal 2	1.00	1.35	1.35	1.23	0.88
Sinal 3	0.71	0.72	0.85	0.88	0.66
Sinal 4	1.06	1.13	1.22	1.20	0.87
Sinal 5	0.81	0.83	0.67	0.71	0.55
Sinal 6	0.76	0.93	1.08	0.95	0.64
Sinal 7	0.77	0.78	0.70	0.71	0.54
Drift Médio	0.81	0.93	0.99	0.96	0.69
Drift SRSS	0.69	0.93	0.92	0.77	0.51
Diferença (%)	14.76	0.65	6.68	19.17	26.69

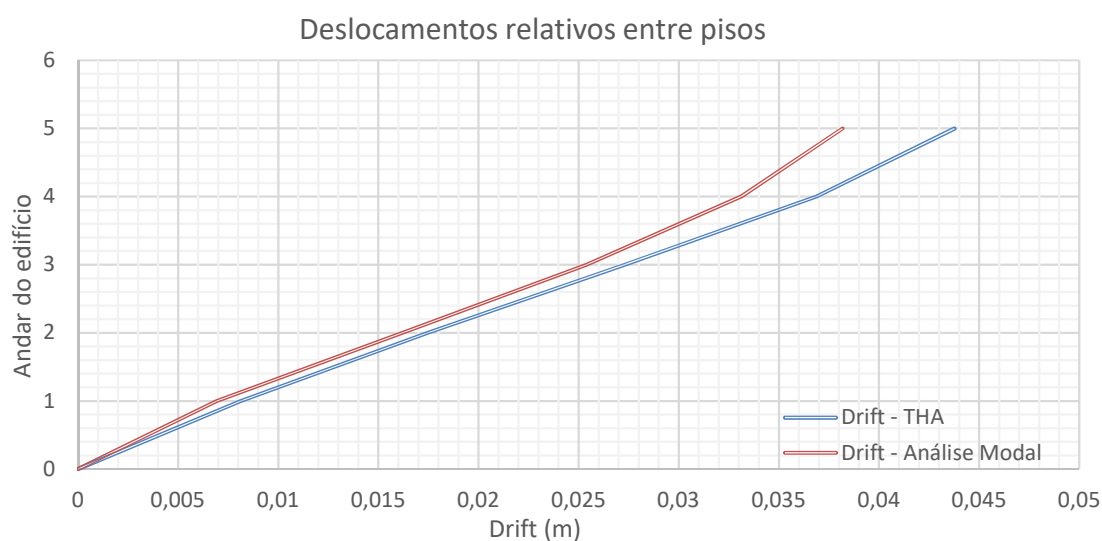


Fig. 5.13 – Gráfico da evolução dos deslocamentos entre pisos calculados pela média dos sinais e pelo espectro de resposta

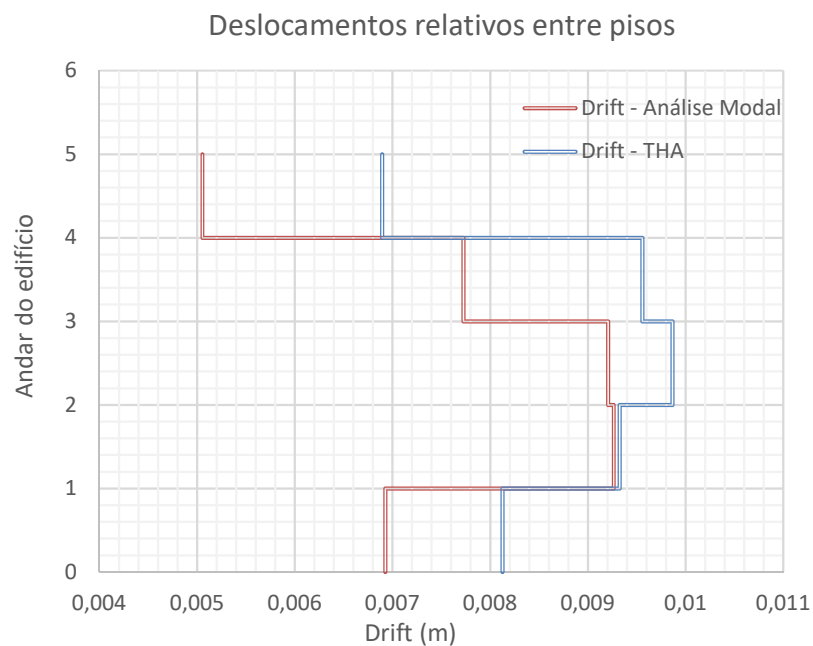


Fig. 5.14 – Gráfico da distribuição ao longo da altura do deslocamento relativo entre pisos para ambas as análises

5.6.3 ESFORÇOS NOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Seguindo o mesmo raciocínio, foram obtidos valores para os esforços (axiais, transversos e momentos fletores) nos elementos verticais e horizontais, os quais se encontram destacados na Fig. 5.15. Estes valores foram extraídos para ambas as extremidades (inferior e superior, no caso das barras verticais; esquerda e direita, no caso das barras horizontais) de cada elemento selecionado.

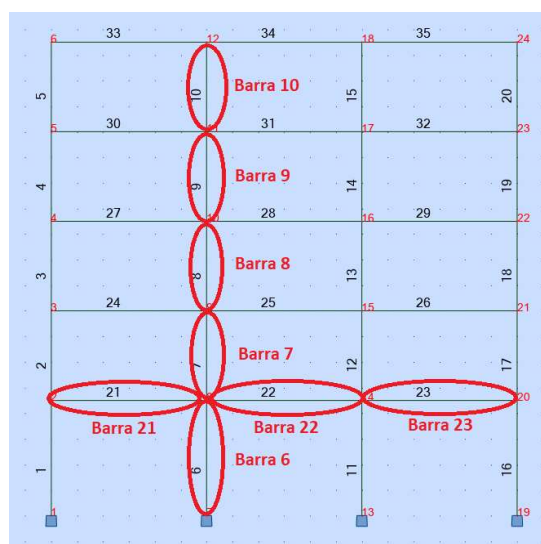


Fig. 5.15 – Identificação das barras analisadas

Para o caso da análise do histórico no tempo, foram extraídos os valores máximos da força para cada sinal selecionado, de modo a possibilitar o cálculo da média destes valores para cada extremidade. Essa

média é apresentada no Quadro 5.8 e pode ser comparada com o resultado da força resultante da análise espectral, segundo o método de sobreposição modal SRSS, também apresentada no mesmo quadro. Verifica-se que os resultados dos esforços entre ambas as análises consideradas são semelhantes entre si no que diz respeito às barras verticais, sendo que a análise *time history* apresenta, de um modo geral, valores de esforços mais conservativos do que a análise modal por espectro de resposta.

Quadro 5.8 – Valores dos esforços para ambas as análises consideradas

Esforços Máximos		Média dos Sinais - THA			Análise Modal - MRSA (SRSS)		
		FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
Barra 6	Ext. Inf.	990.05	104.74	326.76	989.86	105.45	317.40
	Ext. Sup.	990.05	104.74	195.45	989.86	105.45	157.75
Barra 7	Ext. Inf.	790.44	115.11	186.93	789.53	113.86	200.85
	Ext. Sup.	790.44	115.11	199.64	789.53	113.86	199.72
Barra 8	Ext. Inf.	592.16	95.71	172.99	591.24	91.03	163.41
	Ext. Sup.	592.16	95.71	164.51	591.24	91.03	158.10
Barra 9	Ext. Inf.	395.00	84.79	136.71	394.45	71.40	110.30
	Ext. Sup.	395.00	84.79	162.71	394.45	71.40	142.48
Barra 10	Ext. Inf.	199.43	59.26	74.39	199.12	50.46	62.17
	Ext. Sup.	199.43	59.26	137.59	199.12	50.46	116.39
Barra 21	Ext. Esq.	4.08	156.57	97.20	39.72	33.97	100.46
	Ext. Dir.	4.08	156.57	661.94	39.72	160.43	278.90
Barra 22	Ext. Esq.	-14.98	153.65	70.18	17.47	40.34	73.21
	Ext. Dir.	-14.98	153.65	655.19	17.47	154.06	267.94
Barra 23	Ext. Esq.	3.13	160.14	76.56	3.32	37.54	79.66
	Ext. Dir.	3.13	160.14	682.85	3.32	156.86	278.29

5.6.4 REAÇÕES NOS APOIOS

Com o intuito de identificar e comparar o corte basal da estrutura para as duas análises em estudo, foram extraídos os valores das reações em cada um dos quatro apoios do edifício, o que corresponde aos nós 1, 7, 13 e 19, como verificado na Fig. 5.16.

Tais valores estão explicitados no Quadro 5.9, verificando-se uma boa comparação entre as duas análises. Relativamente ao corte basal do edifício, é possível aferir que na análise dinâmica linear (THA) o corte é superior ao obtido na análise espectral. Este resultado indica que a análise espectral poderá não fornecer valores conservativos da resposta sísmica da estrutura.

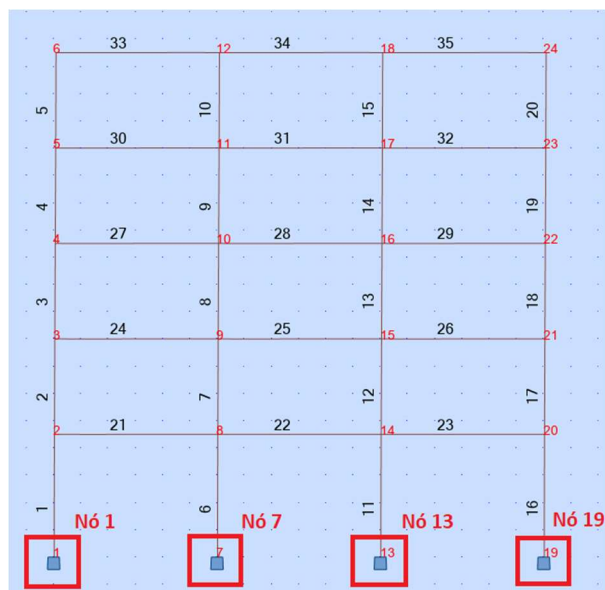


Fig. 5.16 – Identificação dos nós relativos aos apoios

Quadro 5.9 – Valores das reações nos apoios para ambas as análises consideradas

Reações nos Apoios	Média dos Sinais - THA			Análise Modal - MRSA (SRSS)		
	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
Nó 1	101.45	682.27	314.18	73.93	268.24	269.08
Nó 7	109.71	990.05	326.76	105.44	989.85	317.40
Nó 13	109.79	989.28	326.47	105.36	966.06	317.70
Nó 19	78.06	697.90	277.82	97.32	691.83	305.45
Corte Basal	399.02			382.07		

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, foi possível conceber uma ferramenta informática com capacidade para a seleção de registos temporais de aceleração de acordo com o Eurocódigo 8, visando a aplicabilidade destes registos no que se refere a uma análise dinâmica estrutural. Trata-se de uma aplicação com um elevado grau de inovação, dado que não foi possível identificar qualquer outra ferramenta que tenha uma criteriosa seleção de sinais sísmicos de acordo com a compatibilidade com o espectro regulamentar e que seja um projeto *open source*, ou seja, cujo código pode ser disponibilizado para utilização, manutenção e melhorias.

O desenvolvimento modular da ferramenta concede-lhe uma grande capacidade adaptativa, que permite a adição de novos módulos que possibilitam a expansão e o aprimoramento do código já existente, criando assim uma base de trabalho para incorporações futuras. Esta ferramenta tem como objetivo o apoio a engenheiros projetistas de estruturas no tocante à análise dinâmica das estruturas.

Após uma seleção preliminar de registos disponíveis numa base de dados, cujo modelo foi elaborado no âmbito desta dissertação, a ferramenta SeLEQ possibilita a realização de uma seleção de registos baseada em código, incorporando critérios avançados, como o controlo da compatibilidade espectral entre cada registo individual e o espectro regulamentar, o que proporciona maior precisão na estimativa da resposta estrutural. Com o objetivo de reduzir significativamente o custo computacional e o tempo de análise associados à seleção e escalamento de registos sísmicos, foi utilizado um algoritmo de otimização meta-heurístico.

O caso de estudo apresentado no Capítulo 5 permite a utilização dos sinais sísmicos selecionados provenientes da ferramenta SeLEQ no que diz respeito à análise do histórico de acelerações no tempo (*time history analysis*). Também é realizada uma comparação das respostas provenientes desta análise com as respostas oriundas de uma análise modal por espectro de resposta. A confrontação das respostas em termos de deslocamentos e esforços resulta numa diferença considerada como aceitável, verificando-se, no entanto, que os valores da resposta sísmica na análise espectral são, em alguns casos, inferiores aos obtidos na análise *time history*.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar do objetivo principal do trabalho ter sido atingido, devido a limitações concernentes ao curto período de tempo atribuído à realização desta dissertação, algumas funcionalidades relevantes não

puderam ser implementadas. Assim sendo, a autora apresenta algumas recomendações e propostas a serem levadas em consideração na hipótese de haver continuidade do desenvolvimento deste trabalho no futuro.

Uma sugestão seria a extensão da ferramenta a outras bases de dados, com a finalidade de alargar a quantidade de informação sobre os eventos sísmicos reais. Esta implementação pode ser facilmente integrada na ferramenta, uma vez que a arquitetura modular da framework permite fáceis inclusões de bases de dados. São sugeridos alguns exemplos de bases de dados a serem implementadas: ESD, ITACA, RESORCE e PEER NGA-WEST2.

Tendo em conta que o programa está preparado para ser utilizado na *Web*, com acesso fácil de qualquer parte do mundo, a implementação de novos códigos regulamentares para definição do espectro alvo também seria pertinente para a ferramenta, visto que permitiria alcançar um patamar mais global de utilização, pois não ficaria restrito apenas às normas europeias. Como exemplo, podem ser ainda implementadas as normas americanas e neozelandesas.

Adicionalmente, também seria importante acrescentar uma funcionalidade alternativa de avaliação do espectro alvo, por meio do Espectro Médio Condicional (CMS), pois é um método que apresenta um rigor maior do que o método regulamentar, visto que é dirigido, de forma mais específica, para a estrutura e seu local de implantação, enquanto que o espectro alvo do código pode conduzir a um cenário demasiado conservativo e exigente para a estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CEN ECfS. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.
2. 235/83 D-Ln. Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes. Diário da República nº 125/1983, Série I de 1983-05-31.1991 - 2024.
3. Araújo M, Macedo L, Marques M, Castro JM. Code-based record selection methods for seismic performance assessment of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2016;45(1):129-48.
4. Bommer JJ, Acevedo AB. THE USE OF REAL EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS AS INPUT TO DYNAMIC ANALYSIS. *Journal of Earthquake Engineering*. 2004;08(spec01):43-91.
5. Bachman R, Hamburger R, Comartin C, Rojahn C, Whittaker A. ATC-58 framework for performance-based design of nonstructural components2003.
6. Bradley. Design Seismic Demands from Seismic Response Analyses: A Probability-Based Approach. *Earthquake Spectra*. 2011;27(1):213-24.
7. ASCE, editor Seismic evaluation and retrofit of existing buildings2014: American Society of Civil Engineers.
8. Macedo L, Castro JM. SeIEQ: An advanced ground motion record selection and scaling framework. *Advances in Engineering Software*. 2017;114:32-47.
9. NZS. NZS 1170.5: 2004 Structural Design Actions Part 5: Earthquake actions–New Zealand. Wellington, New Zealand: Standards New Zealand2004.
10. Backer J, Cornell A. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2005;34(10):1193-217.
11. Macedo L. Performance-based seismic design and assessment of steel moment frame buildings. 2017.
12. Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. NGA Project Strong-Motion Database. *Earthquake Spectra*. 2008;24(1):23-44.
13. Iervolino I, Galasso C, Cosenza E. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2010;8(2):339-62.
14. CS.LL.PP. DM 14 Gennaio, Norme tecniche per le costruzioni. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* 29 (in Italian). 2008.
15. Haydar Kayhan A, Armagan Korkmaz K, Irfanoglu A. Selecting and scaling real ground motion records using harmony search algorithm. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011;31(7):941-53.
16. Chen PP-S. The Entity-Relationship Model—Toward a Unified View of Data A2 - Mylopoulos, John. In: Brodie M, editor. *Readings in Artificial Intelligence and Databases*. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann; 1989. p. 98-111.
17. Dias J, Castro JM, Romão X, Gonçalves M, Lopes JC. SeIEQ: a web-based application for the selection of earthquake ground motions for structural analysis. *Proceedings of the 14th European conference of earthquake engineering, Ohrid, Macedonia*. 2010.